



Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Unand.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Unand.

STUDI PENGARUH PENGGUNAAN BASE ISOLATION TERHADAP JARAK ANTAR BANGUNAN SEHINGGA TIDAK TERJADINYA POUNDING

TESIS



**ERY APRILLA PRATIWI, ST
0821216023**

**PROGRAM PASCASARJANA
UNIVERSITAS ANDALAS
PADANG 2011**

**STUDI PENGARUH PENGGUNAAN *BASE ISOLATION* TERHADAP
JARAK ANTAR BANGUNAN SEHINGGA TIDAK TERJADINYA
*POUNDING***

Oleh: Ery Aprilla Pratiwi, ST

(dibawah bimbingan : Jati Sunaryati, Ph.D dan Dr. Eng. Febrin Anas Ismail)

RINGKASAN

Struktur gedung sering dibangun saling berdekatan satu sama lainnya. Hal ini disebabkan karena terbatasnya lahan dan harga lahan atau tanah yang semakin mahal. Berkaitan dengan kondisi bangunan yang saling berdekatan, pergerakan tanah saat terjadi gempa bumi dapat menimbulkan benturan antar gedung yang berdekatan apabila jarak kedua gedung tersebut tidak mencukupi untuk menampung respon getaran bebasnya.

Salah satu upaya untuk mengurangi kerusakan akibat gempa bumi, telah dikembangkan desain struktur dengan system isolasi dasar pada bangunan (*Base Isolated Structure*). Namun, pergerakan dari sistem isolasi dasar bangunan dengan percepatan gempa yang besar juga dapat menimbulkan benturan pada bangunan jika jarak yang diperlukan tidak diperhitungkan dengan cermat. Analisis dilakukan pada tiga model struktur yang memiliki kekakuan dan tinggi gedung yang sama.

Hasil analisis didapatkan bahwa perpindahan gedung yang besar serta jarak antar gedung yang kecil memungkinkan terjadinya benturan saat terjadinya gempa bumi. Pada bangunan *fixed base* dan bangunan yang salah satunya menggunakan base

isolation, jarak antar gedung yang disyaratkan 0.025 tinggi bangunan masih aman digunakan untuk menghindari pounding. Pada bangunan base isolation, jika dianalisis dari *rollout displacement* bantalan isolatornya, maka jarak antar gedung yang disyaratkan tidak memenuhi untuk menghindari pounding.



**STUDI PENGARUH PENGGUNAAN *BASE ISOLATION*
TERHADAP JARAK ANTAR BANGUNAN SEHINGGA
TIDAK TERJADINYA *POUNDING***

Oleh:

ERY APRILLA PRATIWI, ST

08 212 16 023

TESIS

Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Memperoleh Gelar Magister

Pada Program Studi Teknik Sipil

Pascasarjana Universitas Andalas

PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL

PASCASARJANA

UNIVERSITAS ANDALAS

PADANG

2011

“Allah akan meninggikan

orang-orang yang beriman dan

orang-orang yang diberi ilmu pengetahuan

beberapa derajat”

(Alquran Surat Al-Mujaadilah ayat 11)



..... Kupersembahkan untuk keluargaku tersayang,

papi, mami, papa, mama, uni-uni, adik-adik,

special to abi dan ara

atas doa dan dorongannya.....

DAFTAR RIWAYAT HIDUP

Penulis dilahirkan di Batusangkar pada tanggal 10 April 1986, merupakan anak Keempat dari tujuh bersaudara dari pasangan Bapak Yusrizal. A.S, SH dan ibu Halimah. Z, SPKP. Menamatkan Sekolah Dasar (SD) di Kota Sawahlunto 1998, Sekolah Menengah Pertama (SMP) Negeri 1 Sawahlunto pada tahun 2001 dan Sekolah Menengah Atas (SMA) Negeri 1 Sawahlunto pada tahun 2004 di kota Sawahlunto. Pada tahun 2004 penulis melanjutkan pendidikan di Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Andalas dan menyelesaikan studi tahun 2008. Tahun 2008 penulis melanjutkan ke Program Studi Teknik Sipil Pascasarjana Universitas Andalas



PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi Tesis yang ditulis dengan judul
STUDI PENGARUH PENGGUNAAN *BASE ISOLATION* TERHADAP JARAK
ANTAR BANGUNAN SEHINGGA TIDAK TERJADINYA *POUNDING*.

Adalah hasil kerja saya sendiri dan bukan merupakan jiplakan dari hasil kerja karya orang lain, kecuali kutipan pustaka yang sumbernyadicantumkan. Jika dikemudian hari pernyataan ini tidak benar, maka status kelulusan dan gelar yang saya peroleh menjadi batal dengan sendirinya.

Padang, 8 Agustus 2011

Yang membuat pernyataan

Ery Aprilla Pratiwi, ST

08 212 16 023



KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah Swt yang telah melimpahkan rahmat dan karuniaNya, sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis dengan judul **“Studi Pengaruh Penggunaan Base Isolation Terhadap Jarak Antar Bangunan Sehingga Tidak Terjadinya Pounding”**.

Dalam proses penyusunan tesis ini penulis banyak menerima masukan dan sumbangan pemikiran serta arahan dari berbagai pihak, oleh karena itu dalam kesempatan ini penulis menghaturkan rasa terima kasih kepada:

1. Ibu Jati Sunaryati, Ph.D dan Bapak Febrin Anas Ismail, Dr. Eng yang telah meluangkan waktu untuk member bimbingan, arahan serta dukungan dalam penyusunan tesis ini.
2. Bapak Yossyafra, Ph.D selaku ketua Prodi Teknik Sipil Pascasarjana Universitas Andalas.
3. Bapak Prof. Novirman Jamarun dan seluruh staf Program Pascasarjana Universitas Andalas yang telah menyediakan berbagai fasilitas yang diperlukan untuk penyusunan tesis ini.
4. Keluarga tercinta yang telah memberikan dorongan semangat dan doa kepada penulis dalam penyusunan tesis ini.
5. Rekan-rekan angkatan 2008 Prodi Teknik Sipil Pascasarjana Universitas Andalas khususnya kelompok bidang keahlian struktur, geoteknik dan air.

6. Semua pihak yang telah memberikan bantuan dan dorongan kepada penulis selama penulisan tesis ini.

Penulis menyadari dalam penulisan tesis ini masih jauh dari sempurna, untuk itu penulis mengharapkan kritik dan saran dari semua pihak guna perbaikan tesis ini dimasa mendatang.

Padang, 08 Agustus 2011

Penulis



DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	viii
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR NOTASI	xv
DAFTAR LAMPIRAN	xvi
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Batasan Masalah	3
1.3 Tujuan	4
BAB II TIJAUAN PUSTAKA	
2.1 Penelitian Terdahulu yang Berkaitan dengan Benturan Antar Gedung	5
2.2 Benturan pada Bangunan yang Berdekatan	7
2.2.1 Gempa Bumi	7
2.2.2 Gaya Eksitasi pada Dasar Bangunan	8
2.2.3 Gaya Benturan	8
2.3 Sistem Isolasi Seismik	11
2.3.1 Base Isolation	11
2.3.2 Stabilitas Bantalan <i>Elastomeric</i>	15
2.3.3 Prosedur Desain Sistem Isolasi Seismik	17

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Permodelan Struktur	22
3.2 Desain <i>Base Isolation Structure</i>	29

BAB IV ANALISIS HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Input Beban Eksitasi	39
4.2 <i>Interstory Drift</i> Bangunan	39
4.3 Deformasi Titik Kontak Antar Gedung	40

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan	44
5.2 Saran	44



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1. Model Kedua bangunan yang dianalisis

Gambar 1.2. Model base isolator yang digunakan

Gambar 2.1. Titik gempa yang terjadi di Indonesia

Gambar 2.2. Perpindahan struktur pada dasar pondasi

Gambar 2.3. Formasi lantai kedua bangunan pada saat terjadi benturan

Gambar 2.4. Model 2 massa yang berbenturan

Gambar 2.5 Parameter dua derajat kebebasan sistem isolasi

Gambar 2.6. Penerapan base isolation pada bangunan

Gambar 2.7. Efek Penggunaan base isolation pada bangunan

Gambar 2.8. Kondisi batas tekuk bantalan akibat beban vertical tanpa beban lateral paksa namun mampu menahan rotasi pada ujung-ujung bantalan

Gambar 2.9. Mekanisme *Rollout* pada bantalan isolator

Gambar 2.10 *High Dumping Rubber Bearing*

Gambar 2.11 *Lead Rubber Bearing*

Gambar 2.12 Penampang *elastomeric rubber bearing*

Gambar 3.1. Model I gedung 1 dan 2 adalah bangunan *fixed base*

Gambar 3.2 Model 2 gedung 1 dan 2 adalah bangunan *base isolation*

Gambar 3.3 Model 3 gedung 1 adalah bangunan *fixed base* dan gedung 2 adalah bangunan *base isolation*

Gambar 3.4 Dimensi elastomer hasil desain (non skala)

Gambar 3.5 Skema prosedur penyelesaian studi

Gambar 4.1 Grafik percepatan gempa El Centro

Gambar 4.2 Grafik perbandingan *interstory drift* bangunan *fixed base* dengan bangunan *base isolation system*

Gambar 4.3 Perpindahan pada titik kontak model 1

Gambar 4.4 Perpindahan pada titik kontak model 2

Gambar 4.5 Perpindahan titik kontak model 3



DAFTAR TABEL

Tabel 3.1. Properties elemen struktur yang digunakan



DAFTAR NOTASI

e	:	Koefisien restitusi
V_2^+	:	Kecepatan massa 2 tepat setelah benturan
V_1^+	:	Kecepatan massa 1 tepat setelah benturan
V_2^-	:	Kecepatan massa 2 tepat sebelum benturan
V_1^-	:	Kecepatan massa 1 tepat sebelum benturan
K_H	:	Kekakuan horizontal
K_v	:	Kekakuan vertical
G	:	Modulus Geser
T	:	Perioda
ω	:	Frekuensi natural
g	:	Percepatan gravitasi
E_c	:	Modulus compression karet dan baja komposit
W	:	Berat struktur
S	:	<i>Shape Faktor</i>
R	:	Jari-jari
H	:	Tinggi
L	:	Lebar
t	:	Tebal rubber
n	:	Jumlah layer
\emptyset	:	Diameter
K	:	Modulus bulk material
P_{crit}	:	<i>Buckling load</i>
D_{max}	:	<i>Rollout displacement</i>
E	:	Modulus elastisitas beton
F_y	:	Tegangan leleh baja
m	:	Massa
k	:	Kekakuan

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN A : Grafik Riwayat Perpindahan Seluruh Model

LAMPIRAN B : Deformasi Bantalan Elastomer



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Struktur gedung sering dibangun saling berdekatan satu sama lainnya. Hal ini disebabkan karena terbatasnya lahan dan harga lahan atau tanah yang semakin mahal. Sementara itu, untuk wilayah Indonesia khususnya Sumatera Barat, membangun gedung yang saling berdekatan perlu mendapatkan perhatian, mengingat Sumatera Barat merupakan wilayah yang berada pada zona gempa aktif.

Berkaitan dengan kondisi bangunan yang saling berdekatan, akibat dari pergerakan tanah saat terjadi gempa bumi dapat menimbulkan benturan antar gedung yang berdekatan apabila jarak kedua gedung tersebut tidak mencukupi untuk menampung respon getaran bebasnya. Benturan dapat menimbulkan gaya - gaya dalam tambahan pada elemen struktur, yang mana gaya tersebut biasanya pada perencanaan awal belum diperhitungkan [1]. Gaya dalam akibat benturan ini akan tersuperposisikan dengan gaya dalam akibat beban dinamik itu sendiri, dimana hasil superposisi tersebut dapat mengakibatkan kerusakan atau bahkan keruntuhan. Disamping itu, perbedaan karakteristik dinamik dari gedung-gedung yang berdampingan akan menimbulkan perbedaan phase sehingga benturan tidak akan dapat dihindarkan [1].

Salah satu upaya untuk mengurangi kerusakan akibat gempa bumi, telah dikembangkan desain struktur dengan system isolasi dasar pada bangunan (*Base Isolated Structure*). Sistem isolasi dasar yang banyak digunakan saat ini

adalah sistem isolasi dengan menggunakan bantalan elastomeric. Mekanisme kerjanya adalah karet digunakan untuk mengurangi getaran gempa sedangkan lempengan baja digunakan untuk menambah kekakuan bantalan karet sehingga defleksi dan deformasi bangunan saat bertumpu di atas bantalan karet tidak besar. Pada dasarnya cara perlindungan bangunan oleh bantalan elastomeric ini melalui pengurangan getaran gempa bumi ke arah horizontal dan memungkinkan bangunan untuk bergerak bebas saat berlangsung gempa bumi tanpa tertahan oleh pondasi. Peredam ini bermanfaat untuk menekan kemungkinan resonansi dari frekuensi isolasi.

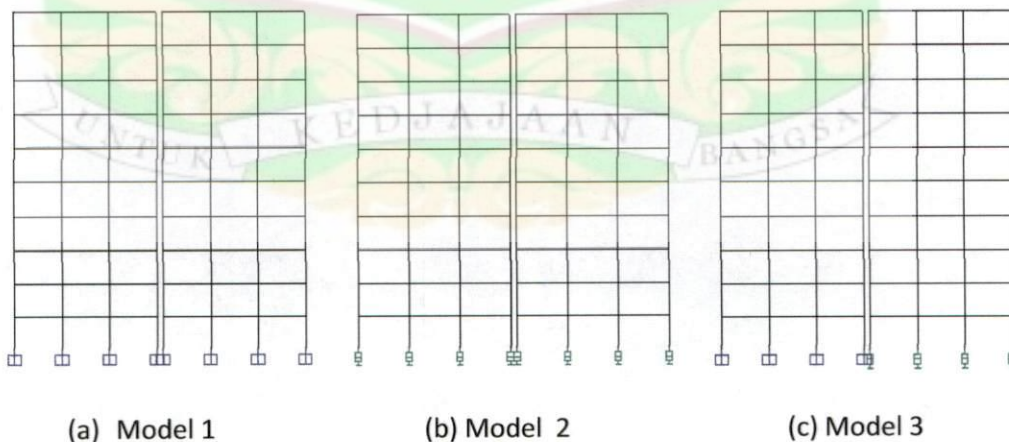
Bantalan karet relatif mudah diproduksi, tahan terhadap lingkungan dan tidak terpengaruh oleh waktu. Bantalan ini sangat kuat dan kaku dalam arah vertikal dan sangat fleksibel dalam arah horizontal. Namun, pergerakan dari system isolasi dasar bangunan dengan percepatan gempa yang besar juga dapat menimbulkan benturan pada bangunan jika jarak yang diperlukan tidak diperhitungkan dengan cermat. Oleh karena base isolation merupakan metode yang relatif baru di Indonesia, maka fenomena benturan pada bangunan base isolation belum cukup banyak diteliti sampai saat ini. Oleh sebab itu studi ini dilakukan untuk mengkaji pengaruh penggunaan base isolator terhadap jarak antar gedung agar tidak berbenturan.

Dalam tesis ini bangunan yang akan dianalisis dimodelkan dengan model dua dimensi, dimana strukturnya berupa bangunan 2 lantai yang saling berdekatan dengan memperhitungkan properties tanah dibawah bangunan. Benturan diasumsikan hanya terjadi pada tiap lantai.

1.2 Batasan Masalah

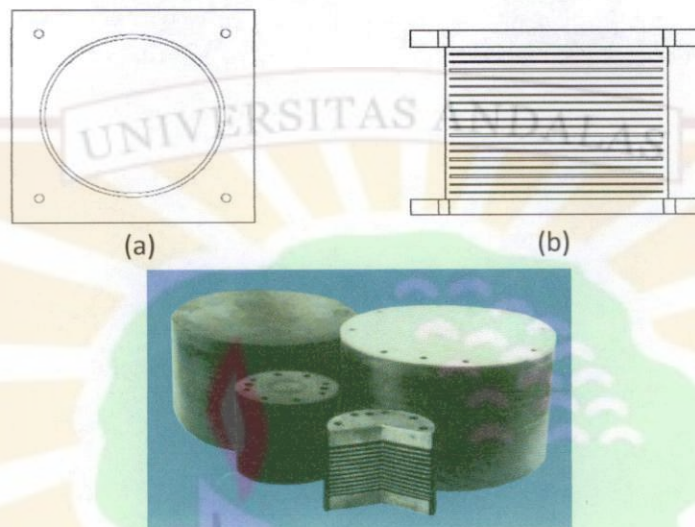
Analisa pengaruh base isolator terhadap jarak antar gedung agar tidak berbenturan didasarkan pada asumsi – asumsi berikut :

- ✚ Kedua bangunan yang akan dibandingkan merupakan struktur beton bertulang 10 lantai dengan tinggi sama, dan kekakuan antar tingkat sama serta dimodelkan sebagai struktur 2 dimensi.
- ✚ Jarak pemisah antar gedung merupakan delatasi minimum gedung 0.025 dari tinggi bangunan berdasarkan SNI-1726-2002 pasal 8.2.3.
- ✚ Benturan diakibatkan oleh gerakan horizontal kedua gedung.
- ✚ Gaya eksitasi yang diberikan berupa beban gempa El Centro.
- ✚ Struktur yang akan dianalisis adalah dua bangunan yang saling berdekatan dengan membandingkan 3 Model :
 - (a). Model 1 : gedung 1 dan 2 adalah bangunan *fixed base*.
 - (b). Model 2 : gedung 1 dan 2 adalah bangunan *base isolation*.
 - (c). Model 3 : gedung 1 adalah bangunan *fixed base* dan gedung 2 adalah bangunan *base isolation*.



Gambar 1.1. Model Kedua bangunan yang dianalisis.

- ✚ Selama terjadi benturan model dianggap masih berperilaku elastik.
- ✚ Benturan diasumsikan hanya terjadi pada titik kontak tiap lantai dengan menganggap lantai benar-benar kaku.
- ✚ Base isolator yang digunakan adalah Elastomeric Rubber Bearing.



Gambar 1.2. Model base isolator yang digunakan (a) Tampak atas isolator (b) potongan penampang isolator (c) rubber yang digunakan pada isolator [6]

1.3 Tujuan

Adapun tujuan dari tesis ini adalah :

1. Mengetahui pengaruh deformasi dan jarak antar gedung terhadap benturan pada gedung yang saling berdekatan.
2. Mengetahui pengaruh penggunaan base isolator pada bangunan yang saling berdekatan. Apakah syarat jarak minimal $0.025H$ masih berlaku untuk tidak terjadinya benturan ? Sehingga diharapkan nantinya didapatkan suatu standar untuk jarak minimum antar gedung yang menggunakan base isolator agar tidak berbenturan selama terjadinya gempa.

BAB II

TIJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu yang Berkaitan dengan Benturan Antar Gedung

Cara paling sederhana untuk mengurangi atau menghindari benturan ini adalah dengan menyediakan jarak yang cukup antar bangunan. IBC (2000) menetapkan jarak minimum antar bangunan yang berdekatan dinyatakan sebagai akar dari jumlah perpindahan kwadrat masing-masing bangunan [2].

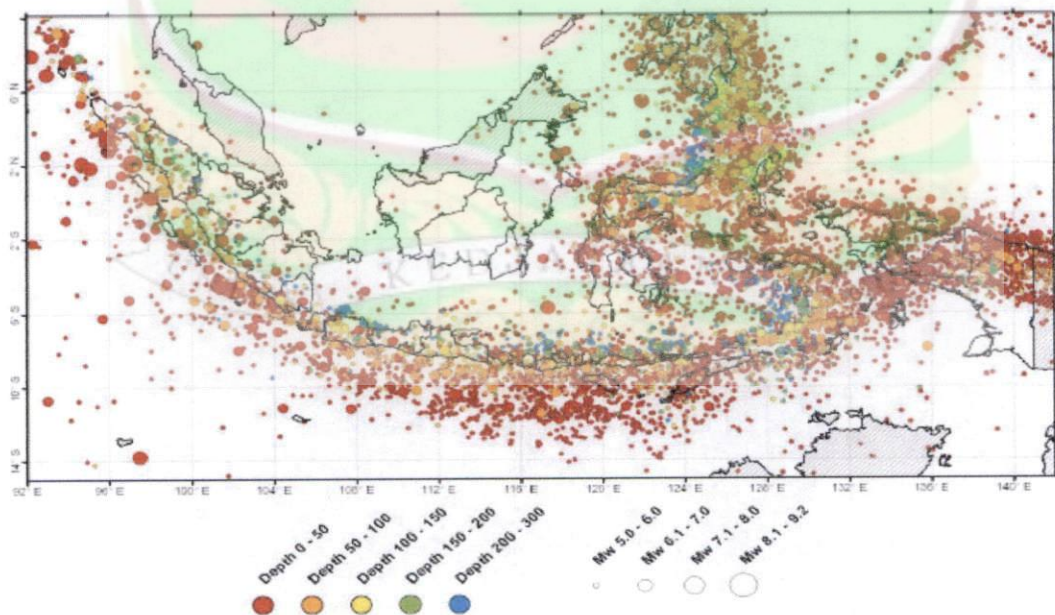
Kasai et al (1996) menggunakan suatu metode *spectral difference* (SPD) dalam menghitung jarak minimum yang diperlukan antar bangunan. Sedangkan Penzien (1997) menggunakan metode *complete quadratic mode combination* (CQC) untuk menghitung jarak pemisahan gedung. Kedua Metode SPD dan CQC ini memberikan nilai yang kecil untuk jarak minimum antara dua gedung jika dibandingkan dengan hasil yang ditetapkan oleh peraturan IBC (2000) [2]. Lin (1997) menggunakan *random vibration theory* dalam menentukan jarak minimum antar gedung dan menghitung rata-rata serta standar deviasinya [2]. Lin dan Weng (2001) menghitung kemungkinan benturan antar struktur yang berdekatan yang dipisahkan dengan ketentuan jarak tertentu dan distribusi kemungkinan jarak pemisah yang diperlukan antara bangunan yang berdekatan untuk menghindari benturan [2]. Respon dinamik dari bangunan yang berdekatan juga dipelajari oleh Westermo (1989) yang mana Westermo ini menghubungkan kedua bangunan tersebut pada level lantai dengan suatu perletakan engsel pada ujung balok untuk menghindari pemisahan [2]. Valles (1997) memperkenalkan konsep radius pseudo energy

untuk mempelajari benturan dalam hubungannya dengan energi dan menghitung gap (jarak minimum pemisah) untuk menghindari benturan pada struktur inelastic [2]. Reni (1998) membahas tentang benturan dua struktur portal yang dimodelkan sebagai MDOF diskret dibawah beban dinamik. Tujuannya adalah untuk mendapatkan gap minimum antar bangunan yang dapat bernilai kurang dari jumlah nilai mutlak simpangan relative maksimum dari kedua bangunan dibawah beban gempa rencana. Parameter yang divariasikan adalah massa struktur dan gap awal antar bangunan. Hasil yang didapatkan adalah benturan dapat mengakibatkan peningkatan simpangan relative pada model, sedangkan gaya tumbukan tidak selalu berkurang dengan bertambahnya gap awal. Amplifikasi simpangan relative terbesar dialami oleh model dengan perioda terkecil. Gaya bentur dapat diperkecil dengan memperkecil kekakuan bentur pada zona kontak [8]. Sudarmono (1999) membahas tentang simulasi numeric benturan dua struktur tiga dimensi dibawah beban dinamik. Tujuannya adalah untuk mengetahui pengaruh parameter dinamik dan gap inisial terhadap besaran tumbukan apabila bangunan mengalami beban bentur, sehingga dengan variasi besaran diatas didapatkan gap minimum untuk menghindari benturan. Hasil yang didapatkan adalah gaya bentur meningkat pada sistem yang memiliki massa lebih besar. Makin kecil gap awal maka akan semakin besar gaya bentur yang terjadi, namun gaya bentur maksimum bukan pada saat gap initial 0.0 cm. Semakin besar kekakuan zona kontak maka semakin besar pula gaya bentur yang terjadi. Dengan memperbesar dimensi elemen struktur terutama kolom, bukan memberikan efek kekuatan yang berarti melainkan menambah efek rotasi [1].

2.2 Benturan pada Bangunan yang Berdekatan

2.2.1 Gempa Bumi

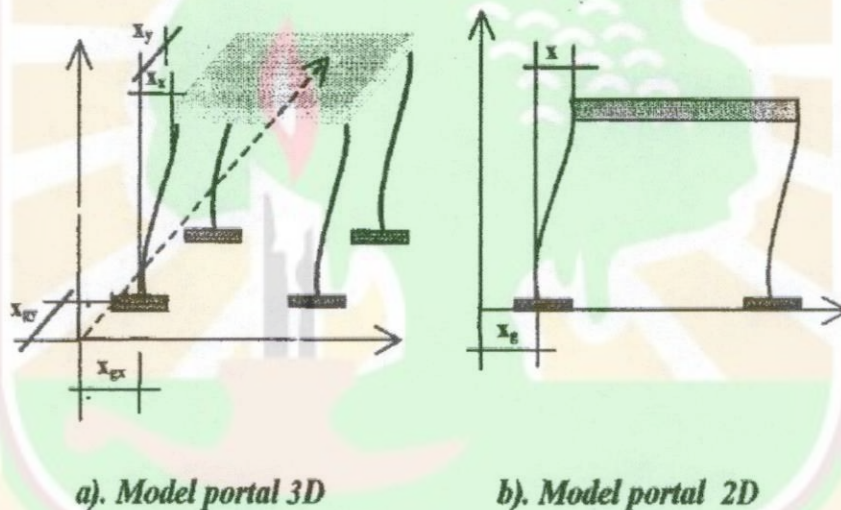
Gempa bumi merupakan fenomena alam yang sering terjadi di wilayah Indonesia karena posisi geografisnya menempati zona tektonik yang sangat aktif. Hal ini dikarenakan tiga lempeng besar dunia dan sembilan lempeng kecil lainnya saling bertemu di wilayah Indonesia serta membentuk jalur-jalur pertemuan lempeng yang kompleks. Keberadaan interaksi antar lempeng-lempeng ini menempatkan wilayah Indonesia sebagai wilayah yang sangat rawan terhadap gempa bumi. Tingginya aktivitas kegempaan ini terlihat dari hasil rekaman dan catatan sejarah dalam rentang waktu 1900-2009 terdapat lebih dari 50.000 kejadian gempa dengan magnituda $M \geq 5.0$ dan setelah dihilangkan gempa ikutannya terdapat lebih dari 14.000 gempa utama (*main shocks*) [7]. Kejadian gempa utama dalam rentang waktu tersebut dapat dilihat dalam Gambar 2.1. yang dikumpulkan dari berbagai sumber.



Gambar 2.1. Titik gempa yang terjadi di Indonesia [7].

2.2.2 Gaya Eksitasi pada Dasar Bangunan

Pada umumnya gempa bumi akan mengakibatkan bangunan mengalami gaya eksitasi pada dasar pondasi yang besarnya tergantung massa bangunan dan percepatan gempa. Gambar 2.2. mengilustrasikan bangunan sederhana 3 dimensi dan 2 dimensi yang mengalami gaya eksitasi pada dasar pondasi. perpindahan relatif x pada puncak bangunan terhadap dasar pondasi dapat ditentukan apabila perpindahan pada dasar pondasi akibat gempa bumi dinyatakan dalam $X_g(t)$.



Gambar 2.2. Perpindahan struktur pada dasar pondasi [1].

2.2.3 Gaya Benturan

Bangunan yang saling berdekatan memiliki periode dan perpindahan lateral yang berbeda. Karena perbedaan periode dan perpindahan lateral tersebut, menyebabkan kehancuran tahap demi tahap dari komponen masing-masing gedung akibat benturan/hentakan tak sefase antara keduanya saat terjadi gempa bumi. Bentuk geometrik dan properties material dari struktur bangunan

juga memberikan pengaruh yang signifikan terhadap pergerakan gempa pada bangunan yang saling berdekatan. Massa bangunan dan percepatan getaran yang besar juga dapat menyebabkan kerusakan lokal selama pergerakan gempa. Peristiwa ini merupakan respon benturan pada bangunan yang berdekatan saat terjadi gempa. Peristiwa ini tidak hanya terjadi pada bangunan gedung saja, tetapi juga pada jembatan gelagar. Cara yang cukup sederhana untuk mengurangi pengaruh benturan ini adalah dengan memberikan spasi/jarak yang cukup antara bangunan.

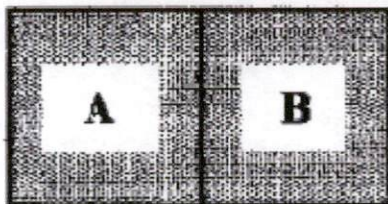
Benturan akan terjadi apabila jarak antara kedua bangunan menjadi nol atau negatif, dengan kemungkinan formasi kedua lantai adalah :

- Kondisi umum benturan akibat rotasi yang berlawanan dari bangunan A dan B

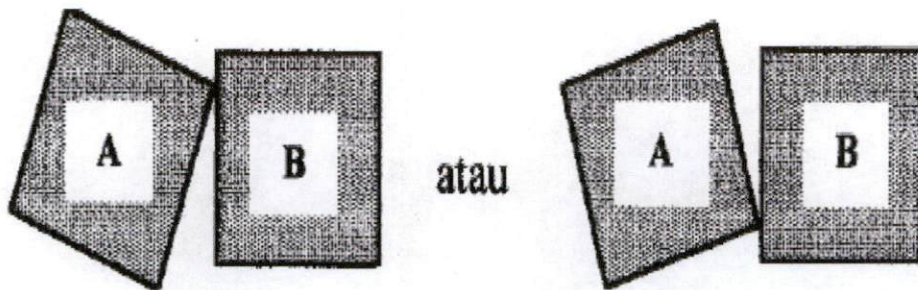


- Kondisi khusus :

a. Benturan akibat gerakan translasi arah sumbu x



b. Benturan akibat rotasi bangunan A



c. Benturan akibat rotasi bangunan B

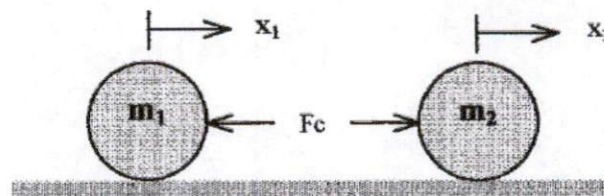


Gambar 2.3. Formasi lantai kedua bangunan pada saat terjadi benturan [1].

Bila dua bodi masing-masing bermassa m_1 dan m_2 saling berbenturan maka pada kedua massa tersebut akan timbul gaya benturan F_c . Gaya benturan ini menurut Hukum Newton III adalah :

“ Aksi timbal balik satu terhadap yang lain antara dua benda yang bertumbukan selalu sama besar dan berarah ke bagian yang berlawanan.”

Berikut ini ditunjukkan gambar benturan dua massa m_1 dan m_2 :



Gambar 2.4. Model 2 massa yang berbenturan [1].

Benturan dibedakan menurut tetap tidaknya kerja kinematik selama proses, jika jumlah energy kinetic kedua massa tetap maka benturan disebut elastic, jika tidak disebut inelastic. Prilaku benturan dapat diketahui dari koefisien restitusi e dengan kemungkinan :

- ❖ $e = 0$, benturan plastis
- ❖ $e = 1$, benturan elastic
- ❖ $e < 1$, benturan non elastic
- ❖ $e > 1$, ada penambahan energy pada kedua massa (benturan paksa).

Besarnya koefisien restitusi ditentukan dengan persamaan :

$$e = - \frac{V_2^+ - V_1^+}{V_2^- - V_1^-} \quad (1)$$

Dimana :

V_2^+ = Kecepatan massa 2 tepat setelah benturan

V_1^+ = Kecepatan massa 1 tepat setelah benturan

V_2^- = Kecepatan massa 2 tepat sebelum benturan

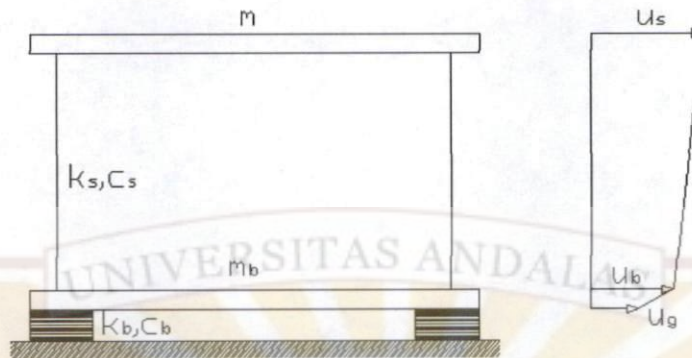
V_1^- = Kecepatan massa 1 tepat sebelum benturan

2.3 Sistem Isolasi Seismik

2.3.1 Base Isolation

Teori isolasi seismic ini berdasarkan pada suatu model struktur dengan 2 massa seperti terlihat dalam gambar 2.5. Massa m merupakan massa struktur atas bangunan dan m_b adalah massa dari lantai dasar diatas sistem isolasi. Kekakuan dan redaman struktur dijelaskan dengan k_s, c_s dan kekakuan serta

redaman isolasi adalah k_b, c_b . Deformasi relatif dari kedua massa didefinisikan dengan u_s dan u_b , dimana u_g adalah perpindahan tanah.



Gambar 2.5 Parameter dua derajat kebebasan sistem isolasi [5]

Perpindahan relatif kedua massa diperlukan untuk menentukan perpindahan sistem isolasi yang dinotasikan dengan v_b dan interstory drift yang dinotasikan dengan v_s .

$$v_b = u_b - u_g \quad (2)$$

$$v_s = u_s - u_b \quad (3)$$

Sehingga untuk kondisi ini persamaan gerak dasar model dua derajat kebebasannya adalah seperti dibawah ini :

$$(m+m_b) \ddot{v}_b + m \ddot{v}_s + c_b \dot{v}_b + k_b v_b = -(m+m_b) \ddot{u}_g \quad (4)$$

$$m \ddot{v}_b + m \ddot{v}_s + c_s \dot{v}_s + k_s v_s = -m \ddot{u}_g \quad (5)$$

Persamaan diatas dapat ditulis dalam matrik notasi sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} M & m \\ m & m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{v}_b \\ \ddot{v}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_b & 0 \\ 0 & c_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{v}_b \\ \dot{v}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_b & 0 \\ 0 & k_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v_b \\ v_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} M & m \\ m & m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix} \ddot{u}_g \quad (6)$$

Dimana $M = m + m_b$ sehingga dalam matrik notasi menjadi

$$M\ddot{v} + C\dot{v} + kv = -Mr\ddot{u}_g \quad (7)$$

Kita definisikan rasio masa (γ) sebagai berikut :

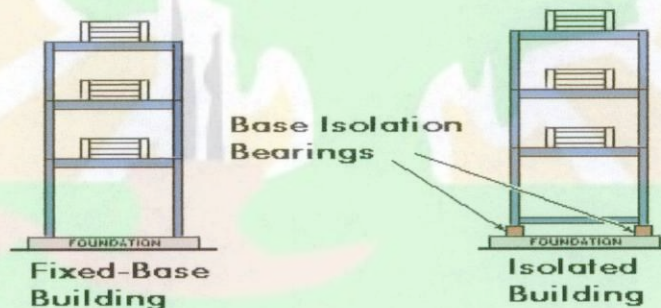
$$\gamma = \frac{m}{m+m_b} = \frac{m}{M} \quad (8)$$

Dan nilai frekuensi ω_b dan ω_s didapatkan dengan :

$$\omega_b^2 = \frac{k_b}{m+m_b} \quad \omega_s^2 = \frac{k_s}{m} \quad (9)$$

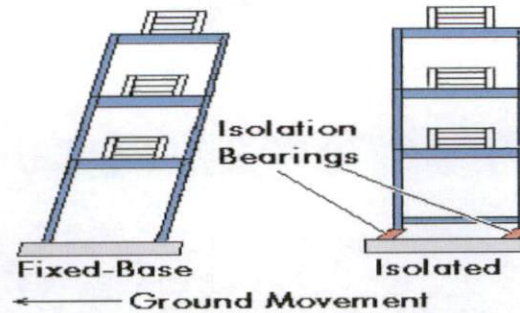
Dimana ω_b adalah frekuensi system isolasi dan ω_s adalah frekuensi struktur atas.

Penerapan system isolasi dasar ini dapat berupa bantalan karet (*elastomeric rubber bearing*) yang diletakkan antara pondasi dengan bangunan atas gedung seperti terlihat dalam gambar 2.6.



Gambar 2.6. Penerapan base isolation pada bangunan [6].

Jika bantalan fleksibel dipilih dengan tepat, deformasi yang disebabkan oleh getaran akan lebih kecil dari pada deformasi yang dialami oleh bangunan yang langsung dibangun diatas tanah. Konsep dasar dari isolasi dasar ini dicontohkan dengan bangunan yang bertumpu pada tumpuan rol, ketika tanah bergetar, tumpuan rol sliding dengan bebas, tapi bangunan diatas tidak ikut bergerak, jadi tidak ada gaya yang ditansfer ke bangunan karena guncangan gempa seperti yang terlihat pada Gambar 2.7. Deformasi yang terjadi hanya pada bagian yang terisolasi, sedangkan struktur atas tetap kaku.



Gambar 2.7. Efek Penggunaan base isolation pada bangunan [6].

Bantalan karet ini terdiri dari karet yang dijepit bersama-sama dengan pelat baja tipis, dibagian atas dan bawahnya terdapat pelat baja untuk memasang bantalan ke bangunan. Bantalan sangat kaku dan kuat dalam arah vertikal, tetapi fleksibel dalam arah horizontal. Bantalan karet didisain untuk menyerap energi gerak (kinetik) akibat gempa dengan merubah energi tersebut menjadi panas, sehingga menambah redaman ke sistem dengan memperkecil amplitudo getaran. Percepatan menurun karena system isolasi dasar pada bangunan memperpanjang periode getaran. Namun, system isolasi dasar ini tidak cocok untuk semua jenis bangunan, terutama untuk bangunan yang dibangun diatas tanah lunak.

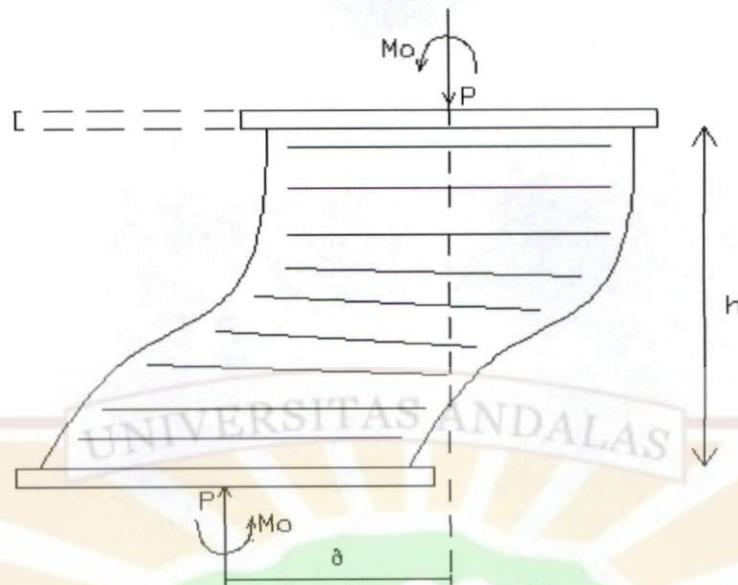
Sistem-sistem isolasi seismik yang ada dapat diklasifikasikan berdasarkan karakteristik dinamikanya dan bagaimana mereka dibentuk dari komponen penyusunnya. Selain itu, terdapat kriteria-kriteria dalam mendisain *Base Isolation*. *Base Isolation* yang didisain harus mampu menopang beban gravitasi maksimum struktur selama bangunan tersebut masih berdiri, dan isolation dapat memberikan dua fungsi periode perpindahan dan disipasi energi pada struktur terisolasi tersebut selama gempabumi terjadi.

Berdasarkan tujuan tersebut, maka harus dipenuhi langkah-langkah disain berikut ini:

- 1) Menentukan ukuran minimum dan lokasi isolation dibawah dimana beban terbesar
- 2) Menghitung dimensi isolation yang akan menghasilkan periode perpindahan yang diinginkan untuk mengurangi beban gempa
- 3) Menentukan *damping ratio* isolation tersebut sehingga deformasi struktur dapat dikontrol dalam batas desain untuk beban angin.
- 4) Cek kemampuan isolation terhadap beban berat, angin, suhu, gempa, dan kondisi-kondisi lain yang mungkin terjadi.

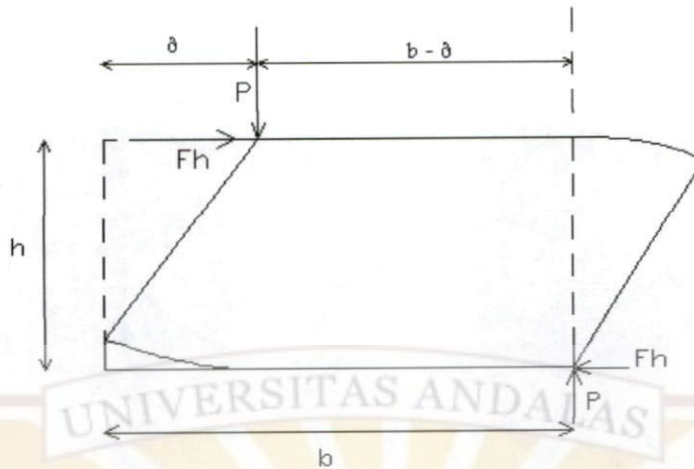
2.3.2 Stabilitas Bantalan *Elastomeric*

Bantalan elastomer multilayer bisa rentan terhadap tekuk sama seperti tekuk yang biasanya pada kolom tetapi besar pengaruhnya akibat kekakuan geser bantalan yang lebih kecil. Oleh karena itu, saat desain bantalan elastomer, dihitung beban vertical maksimum yang dapat didukung oleh bantalan agar tidak mengalami tekuk. Dimana beban yang bekerja pada bantalan elastomer harus lebih kecil dari beban kritis (P_{crit}). Sedangkan pengaruh beban vertical ini diabaikan terhadap kekakuan horizontal bantalan. Untuk situasi yang lazim, pada bantalan elastomer seperti terlihat pada gambar berikut ini bahwa bantalan dipaksa menahan terhadap rotasi pada kedua ujung-ujungnya dan bisa bergerak bebas kesamping pada bagian atas bantalan.



Gambar 2.8 Kondisi batas tekuk bantalan akibat beban vertical tanpa beban lateral paksa namun mampu menahan rotasi pada ujung-ujung bantalan [5]

Pada suatu bantalan isolator meskipun sifatnya stabil pada beban rencana, namun dapat mengalami bentuk ketidakstabilan lainnya jika dihubungkan dengan pondasi bawah dan struktur atas, hal ini dikarenakan geser utama tidak dapat menahan beban tarik. Awalnya, para perancang merasa bahwa karet tidak dipermasalahkan untuk tarik [5], oleh karena itu desain awalnya isolator menggunakan penghubung geser yaitu *dowelled shear connection* dari pada *bolted connection*. *Dowelled shear connection* ini dapat mengalami perilaku tidak stabil yang disebut 'rollout' yang dihubungkan dengan perpindahan lateral dan merupakan batas perpindahan maksimum dari isolator. Bantalan isolator tidak stabil dalam pengertian bahwa diluar perpindahan ini, kurva perpindahan-gaya memiliki penurunan kemiringan. Karena bantalan isolator tidak dapat menahan tarik, perpindahan pada bagian atas dan bawah bantalan isolator disebabkan oleh garis aksi resultan gaya/beban vertikal.



Gambar 2.9 Mekanisme *Rollout* pada bantalan isolator [5]

Dimana b adalah lebar atau diameter bantalan isolator. δ adalah *rollout displacement* dari bantalan isolator, dimana deformasi maksimum bantalan tidak boleh melebihi *rollout displacement*.

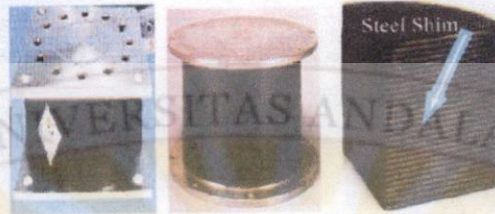
2.3.3 Prosedur Desain Sistem Isolasi Seismik

Secara umum bantalan ini terbagi ke dalam dua kategori : *Laminated Rubber Bearing* dan *Friction Pendulum Sliding Bearing*. Untuk tesis ini yang ditinjau adalah *laminated rubber bearing* dengan menggunakan jenis HDRB (*High-Dumper Rubber Bearing*) yang selanjutnya disebut *elatomeric rubber bearing*.

Laminated rubber bearing terdiri dari lapisan karet alami yang divulkanisir sebagai pemisah antara pelat baja. Pelat baja digunakan untuk mengurangi pembengkakan karet ke samping secara berlebihan dan juga menambah kekakuan vertikal. *Laminated rubber bearing* terdiri dari :

1). *High Dumping Rubber Bearing (HDRB)*

High Dumping Rubber Bearing adalah laminated rubber bearing yang cocok sebagai peredam dengan satu alat yang mendukung struktur, menyimpan gaya elastis dan menggunakan peredam 10-15 % dari beban kritis.



Gambar 2.10 *High Dumping Rubber Bearing* [6]

HDRD terdiri dari beberapa lapisan elastomer yang terbuat dari senyawa karet yang disisipi khusus dipisahkan oleh pelat baja yang dicetak ke lapisan karet dan dapat dibuat berbentuk segi empat ataupun lingkaran. HDRB mempunyai kekakuan vertikal, mampu menahan gaya gravitasi vertikal, sementara kelenturan mampu menahan perpindahan horizontal yang besar.

2) *Lead Rubber Bearing (LRB)*

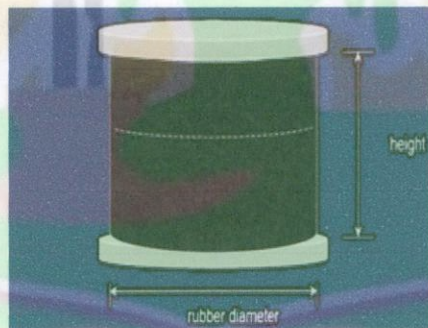
Lead Rubber Bearing adalah sebuah laminated rubber bearing yang lebih besar terbuat dari lapisan karet dan dipadu dengan lapisan baja, tetapi ditengahnya diberi rongga yang diisi dengan lead (perunggu).



Gambar 2.11 *Lead Rubber Bearing* [6]

Lead rubber bearing ini didisain sangat kaku dan kuat diarah vertikal dan lentur diarah horizontal sehingga beban vertikal dan lateral yang kecil bisa didukung tanpa menimbulkan perpindahan yang berarti. Lead mengalami kelelahan pada tegangan rendah dan berperilaku sebagai solid elastis-plastis. Kekakuan pasca kelelahan dapat direpresentasikan oleh kekakuan geser lapisan karet. Selain itu, lead memiliki propertis kelelahan yang baik terhadap *cyclic loading* karena dapat memulihkan hampir seluruh propertis mekaniknya tepat setelah terjadi kelelahan.

Disain bantalan pada sistem isolasi seismik perlu dilakukan dengan kalkulasi tertentu untuk memastikan agar bangunan yang ditopangnya tetap berdiri ketika dan setelah gempa terjadi. Berikut ini langkah – langkah dalam mendisain bantalan *elastomeric rubber bearing* :



Gambar 2.12 Penampang *elastomeric rubber bearing* [3].

- 1) Menentukan berat struktur untuk masing-masing kolom (w) dan berat struktur total (W_t).
- 2) Menentukan kekakuan horizontal (K_H) aktual elastomer

$$K_H = \frac{G \cdot A}{t_r} \quad (10)$$

Dimana : G = Modulus Geser elastomer

A = Luas penampang elastomer

t_r = Tebal karet total

- 3) Menentukan frekuensi natural (ω) dan Perioda (T)

$$\omega = \sqrt{\frac{K_H \cdot g}{Wt}} \quad T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (11)$$

g = merupakan percepatan gravitasi (9.807 m/s²)

- 4) Menentukan kekakuan vertikal (K_V)

$$K_V = \frac{E_c \cdot A}{t_r} \quad (12)$$

Dimana : E_c = Compression Modulus rubber dan steel komposit

- 5) Menentukan fungsi bentuk/*shape factor* (S)

$$S = \frac{\phi}{4t} \quad \text{atau} \quad S = \frac{R}{2t} \quad (13)$$

Dimana : ϕ = Diameter elastomer

R = Radius/jari-jari elastomer

t = tebal layer elastomer

- 6) Menentukan *Compression Modulus* (E_c)

$$E_c = \frac{6 \cdot G \cdot S^2 \cdot K}{6 \cdot G \cdot S^2 + K} \quad (14)$$

Dimana : K = modulus bulk material (2000 MPa)

- 7) Menentukan ketebalan elastomer (t)

- 8) Menentukan dimensi elastomer tinggi (H) dan lebar (L)
- 9) Menentukan nilai buckling load : safety factor (Pcrit)

$$P_{crit} = \frac{\pi}{tr} \cdot \sqrt{\frac{Ec \cdot I}{3}} \cdot G \cdot As \quad (15)$$

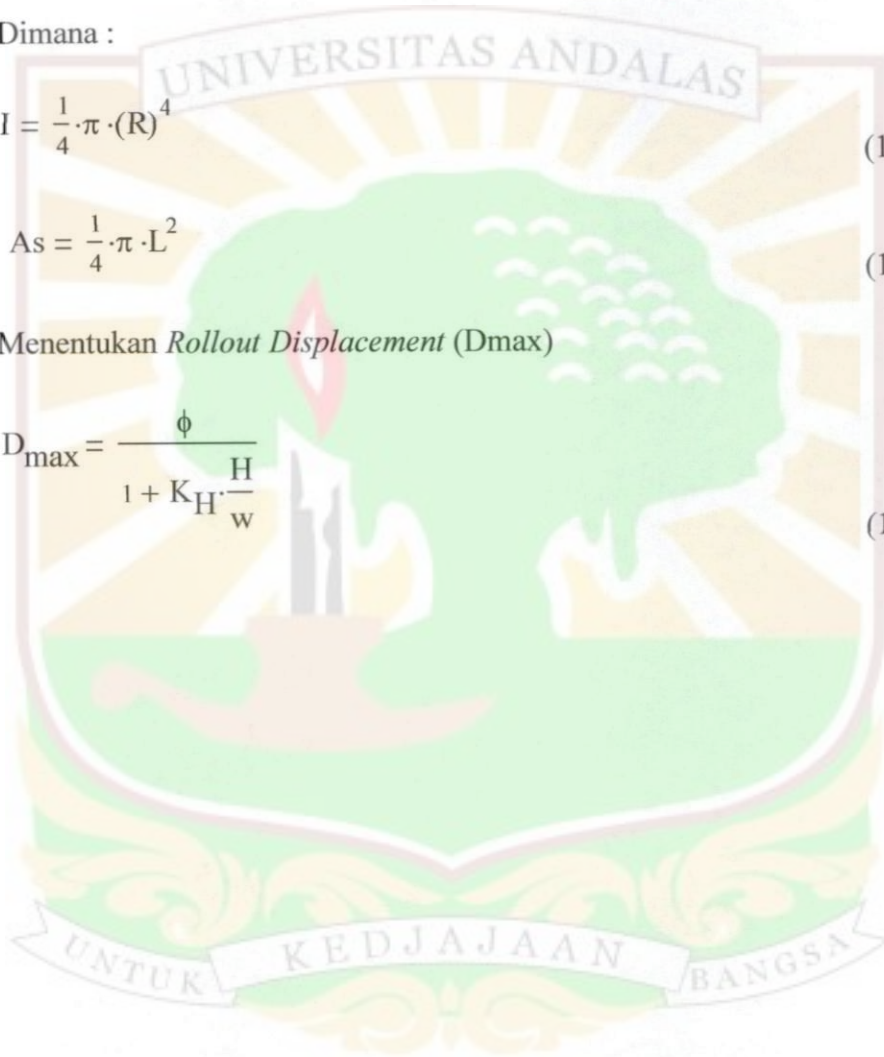
Dimana :

$$I = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot (R)^4 \quad (16)$$

$$As = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot L^2 \quad (17)$$

- 10) Menentukan *Rollout Displacement* (Dmax)

$$D_{max} = \frac{\phi}{1 + K_H \cdot \frac{H}{w}} \quad (18)$$



BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Permodelan Struktur

Studi kasus yang akan dibahas dalam penelitian ini adalah struktur rangka beton. Struktur rangka dapat diidealisasikan dengan susunan elemen balok – kolom yang saling berhubungan dengan titik nodal masing-masingnya. Dimensi elemen balok-kolom dapat dilihat pada tabel 3.1. dibawah ini :

Tabel 3.1. Properties elemen struktur yang digunakan

No.	Elemen	Material	Dimensi (m)	Panjang/Tinggi (m)
1	Balok	Beton Bertulang	0.7 x 0.4	8
2	Balok anak	Beton Bertulang	0.5 x 0.3	4
3	Kolom	Beton Bertulang	1.0 x 1.0	4

Dalam Penelitian ini model yang digunakan berupa bangunan portal bertingkat. Model di set untuk bangunan dengan derajat kebebasan sama dan mutu bahan yang sama, $f_c' = 30$ MPa. Parameter model adalah :

$$\text{Modulus elastisitas beton, } E = 10 \times 4700 \sqrt{f_c'} \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

$$\text{Berat jenis Beton, } \gamma_{\text{beton}} = 2400 \text{ kg/m}^3$$

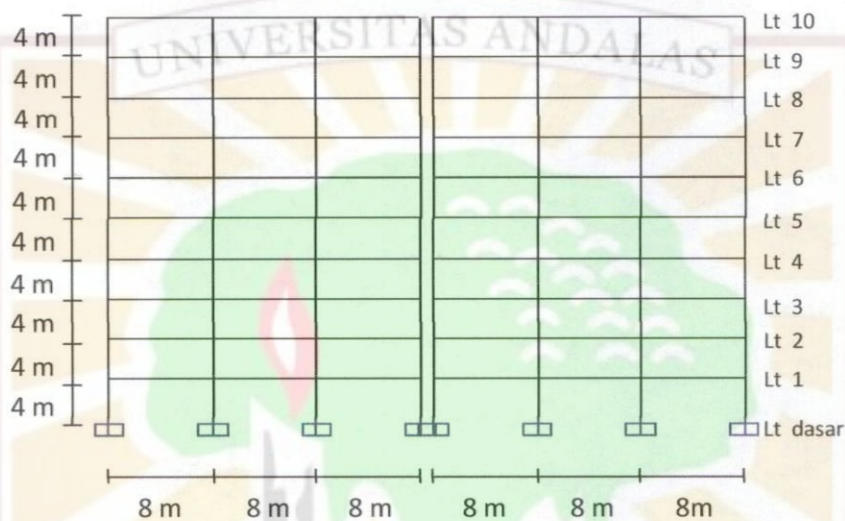
$$\text{Angka poison} = 0.2$$

$$\text{Modulus Geser} = \nu E$$

Dalam penelitian ini studi kasus dilakukan untuk tiga model dengan mengkombinasikan kondisi struktur yaitu struktur *fixed base* dan *base isolation*.

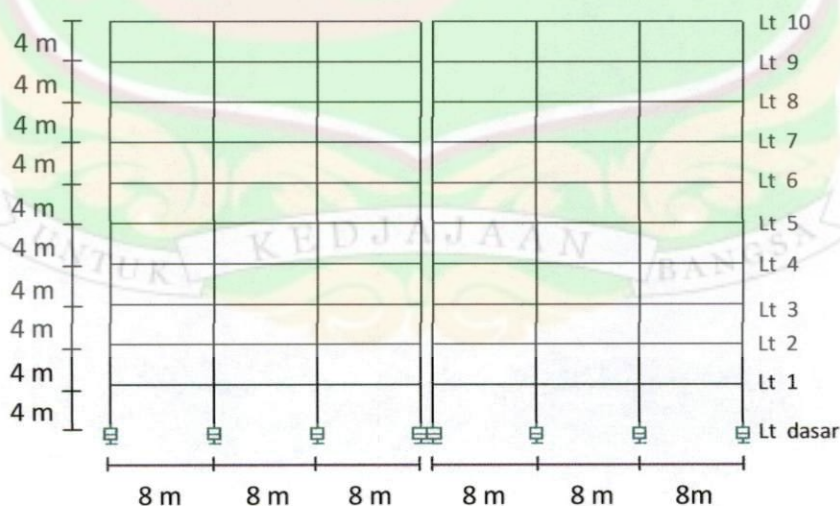
Permodelan dapat dilihat pada gambar dibawah ini :

1) Model I



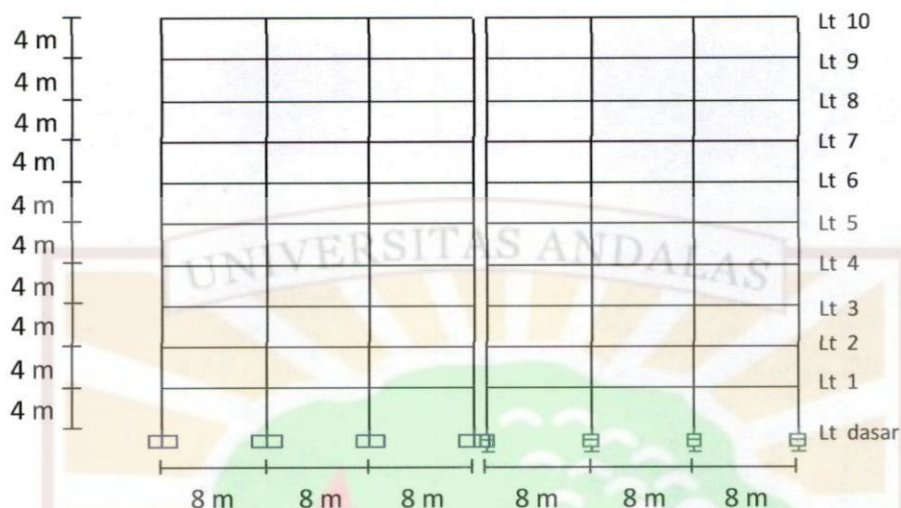
Gambar 3.1 Model I gedung 1 dan 2 adalah bangunan *fixed base*

2) Model II



Gambar 3.2 Model 2 gedung 1 dan 2 adalah bangunan *base isolation*

3) Model III



Gambar 3.3 Model 3 gedung 1 adalah bangunan *fixed base* dan gedung 2 adalah bangunan *base isolation*

Analisis akan dilakukan untuk menentukan riwayat perpindahan pada titik kontak benturan pada gedung tiap lantainya, mulai dari lantai dasar sampai dengan lantai 10. Massa lantai bangunan diperoleh dari perhitungan berikut :

Berat jenis beton = 24000 N/m³

Berat jenis screed+keramik = 21000 N/m³

Tebal screed+keramik = 0.05 m

Berat jenis bata ringan = 800 N/m³

Berat jenis plafond = 150 N/m³

Beban hidup pd lantai = 2500 N/m²

Beban hidup pd atap = 1500 N/m²

- **berat bangunan per lantai (lantai 1 s.d 9)**

Beban mati

-berat kolom (jumlah kolom = 16)

$$\begin{aligned} W_k &= 1.0 \times 1.0 \times 4 \times 24000 \times 16 \\ &= 1,536,000 \quad \text{N} \end{aligned}$$

-berat balok (jumlah balok = 24)

$$\begin{aligned} W_b &= 0.7 \times 0.4 \times 8 \times 24000 \times 24 \\ &= 1,290,240 \quad \text{N} \end{aligned}$$

-berat balok anak (jumlah balok = 36)

$$\begin{aligned} W_{ba} &= 0.5 \times 0.3 \times 4 \times 24000 \times 36 \\ &= 518,400 \quad \text{N} \end{aligned}$$

-berat pelat lantai

$$\begin{aligned} W_{pelat} &= 24 \times 24 \times 0.12 \times 24000 \\ &= 1,658,880 \quad \text{N} \end{aligned}$$

-berat screed+keramik

$$\begin{aligned} W_{s+k} &= 24 \times 24 \times 0.05 \times 21000 \\ &= 604,800 \quad \text{N} \end{aligned}$$

- berat plafond

$$\begin{aligned} W_{\text{plafond}} &= 24 \times 24 \times 150 \\ &= 86,400 \quad \text{N} \end{aligned}$$

- berat dinding

$$\begin{aligned} W_{\text{dinding}} &= 4 \times 8 \times 800 \times 24 \\ &= 614,400 \quad \text{N} \end{aligned}$$

- Berat beban mati total

$$\begin{aligned} W_{\text{mtotal}} &= W_k + W_b + W_{\text{pelat}} + W_{s+k} + W_{\text{plafond}} + W_{\text{dinding}} + W_b \\ &= 6,309,120 \quad \text{N} \end{aligned}$$

Beban hidup

$$\begin{aligned} W_{\text{htotal}} &= 24 \times 24 \times 2500 \\ &= 1,440,000 \quad \text{N} \end{aligned}$$

Total beban lantai 1 s.d 9

$$\begin{aligned} W_{\text{total}} &= W_{\text{mtotal}} + W_{\text{htotal}} \\ &= 6309120 + 1440000 \\ &= 7,749,120 \quad \text{N} \end{aligned}$$

- berat bangunan lantai 10 (atap)

Beban mati

-berat kolom (jumlah kolom = 16)

$$\begin{aligned} W_k &= 1.0 \times 1.0 \times 4 \times 24000 \times 16 \\ &= 1,536,000 \quad \text{N} \end{aligned}$$

-berat balok (jumlah balok = 24)

$$\begin{aligned} W_b &= 0.7 \times 0.4 \times 8 \times 24000 \times 24 \\ &= 1,290,240 \quad \text{N} \end{aligned}$$

-berat balok anak (jumlah balok = 36)

$$\begin{aligned} W_{ba} &= 0.5 \times 0.3 \times 4 \times 24000 \times 36 \\ &= 518,400 \quad \text{N} \end{aligned}$$

-berat pelat atap

$$\begin{aligned} W_{pelat} &= 24 \times 24 \times 0.12 \times 24000 \\ &= 1,658,880 \quad \text{N} \end{aligned}$$

-berat screed+keramik

$$\begin{aligned} W_{s+k} &= 24 \times 24 \times 0.05 \times 21000 \\ &= 604,800 \quad \text{N} \end{aligned}$$

- berat plafond

$$\begin{aligned} W_{\text{plafond}} &= 24 \times 24 \times 150 \\ &= 86,400 \quad \text{N} \end{aligned}$$

- Berat beban mati total

$$\begin{aligned} W_{\text{mtotal}} &= W_k + W_b + W_{\text{pelat}} + W_{s+k} + W_{\text{plafond}} + W_{ba} \\ &= 5,694,720 \quad \text{N} \end{aligned}$$

Beban hidup

$$\begin{aligned} W_{\text{htotal}} &= 24 \times 24 \times 1500 \\ &= 864,000 \quad \text{N} \end{aligned}$$

Total beban lantai 10

$$\begin{aligned} W_{\text{total}} &= W_{\text{mtotal}} + W_{\text{htotal}} \\ &= 5694720 + 864000 \\ &= 6,558,720 \quad \text{N} \end{aligned}$$

Lantai	Berat (N)
1	7749120
2	7749120
3	7749120
4	7749120
5	7749120
6	7749120
7	7749120
8	7749120
9	7749120
10	6558720
Jumlah	76300800

$$W = 76,300,800 \text{ N}$$

$$g = 9.807 \text{ m/s}^2$$

Massa masing-masing lantai gedung :

Massa lantai 1 s.d 9

$$\begin{aligned} m &= \frac{W}{g} \\ &= \frac{7749120}{9.807} \\ &= 790162.1291 \text{ kg} \end{aligned}$$

Massa lantai 10

$$\begin{aligned} m &= \frac{W}{g} \\ &= \frac{6558720}{9.807} \\ &= 668779.4433 \text{ kg} \end{aligned}$$

3.2 Desain *Base Isolation Structure*

Dalam desain struktur terisolasi dasar ini kita perlu mendesain terlebih dahulu bantalan isolator yang akan digunakan. *Base isolation* yang digunakan adalah *elastomeric rubber bearing*. *Shear modulus* (G_B) untuk bantalan digunakan 1.0 MPa. Dimensi bantalan didapat dari perhitungan berikut :

- Berat total struktur (W)

$$W = 76,300,800 \text{ N}$$

- Modulus Geser Elastomer (G)

$$G = 1.0 \text{ Mpa} = 1.0\text{E}+06 \text{ N/m}^2$$

- Periode (T) dan regangan geser max (γ) diasumsikan

$$T = 2.5 \text{ detik} \quad \gamma = 1.5$$

- Percepatan gravitasi

$$g = 9.807 \text{ m/s}^2$$

- Beban masing-masing kolom

$$W_k = 4,997,518 \text{ N}$$

- kekakuan horizontal elastomer

$$\begin{aligned} K_h &= \frac{W_k}{g} \left(\frac{2}{T} \right)^2 \pi^2 \\ &= \frac{5\text{E}+06}{9.807} \left(\frac{2 \times 3.142}{2.5} \right)^2 \\ &= 3219663.84 \text{ N/m} \end{aligned}$$

- menentukan design displacement

damping diasumsikan 10% maka diperoleh nilai berikut :

$$B_d = 1.2 \quad (\text{dari tabel})$$

$$C_{vd} = 0.6 \quad (\text{dari tabel})$$

$$\begin{aligned} D_d &= \frac{g}{4 \pi^2} \times \frac{C_{vd} \times T}{B_d} \\ &= \frac{9.807}{4 \times 3.142^2} \times \frac{0.6 \times 2.5}{1.2} \\ &= 0.2897414 \quad \text{meter} \end{aligned}$$

- Menentukan dimensi elastomer

$$\begin{aligned} t_r &= \frac{D_d}{\gamma} \\ &= \frac{0.29}{1.5} \\ &= 0.193 \quad \text{meter} \end{aligned}$$

$$\text{ambil nilai } t_r = 0.2 \quad \text{meter}$$

- Luas permukaan bantalan

$$\begin{aligned} A &= \frac{K_h \times t_r}{G} \\ &= \frac{3219663.84 \times 0.2}{1.0E+06} \\ &= 0.64 \quad \text{m}^2 \end{aligned}$$

- Diameter bantalan

$$\begin{aligned}\phi &= \sqrt{\frac{4 \times A}{\pi}} \\ &= \sqrt{\frac{4 \times 0.64}{3.142}} \\ &= 0.90541392 \text{ meter}\end{aligned}$$

ambil diameter baru $\phi_b = 0.60 \text{ meter}$

sehingga didapat A baru :

$$\begin{aligned}A_b &= \frac{1}{4} \times \pi \times \phi_b^2 \\ &= \frac{1}{4} \times 3.142 \times 0.60^2 \\ &= 0.28278 \text{ m}^2\end{aligned}$$

didapatkan Kh terbaru :

$$\begin{aligned}K_{hb} &= \frac{G \times A_b}{t_r} \\ &= \frac{1.0E+06 \times 0.28278}{0.2} \\ &= 1.4E+06 \text{ N/m}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}K_{h \text{ total}} &= 16 \times K_{hb} \\ &= 16 \times 1.4E+06 \\ &= 2.3E+07 \text{ N/m}\end{aligned}$$

- menentukan frekuensi dan perioda

$$\text{frekuensi } \omega = \sqrt{\frac{K_{h \text{ total}} \times g}{W}}$$

$$\begin{aligned}
 &= \sqrt{2.3E+07 \times 9.807} \\
 &= 1.70519041 \text{ Hz}
 \end{aligned}$$

perioda

$$\begin{aligned}
 T &= \frac{2 \times \pi}{\omega} \\
 &= \frac{2 \times 3.142}{1.70519} \\
 &= 3.68521895 \text{ detik}
 \end{aligned}$$

- menentukan shape factor (S)

asumsi frekuensi vertical $f_v = 10 \text{ Hz}$

frekuensi horizontal :

$$f_h = \frac{1}{T} = \frac{1}{3.685219} = 0.271354 \text{ Hz}$$

shape factor

$$\begin{aligned}
 S &= \frac{1}{\sqrt{6}} \times \frac{f_v}{f_h} \\
 &= \frac{1}{\sqrt{6}} \times \frac{10}{0.271354} \\
 &= 15.0448434
 \end{aligned}$$

- menentukan modulus compression (Ec)

modulus geser regangan yang kecil terjadi saat $\gamma = 20\%$, dimana komponen rubber

$$\begin{aligned} G_{0.2} &= 1.4 \text{ Mpa} = 1.40\text{E}+06 \text{ N/m}^2 \\ K &= 2000 \text{ Mpa} = 2.00\text{E}+09 \text{ N/m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_c &= \frac{6 \times G_{0.2} \times S^2 \times K}{(6 \times G_{0.2} \times S^2) + K} \\ &= \frac{6 \times 1.40\text{E}+06 \times 15.04484^2 \times 2.00\text{E}+09}{6 \times 1.40\text{E}+06 \times 15.04484^2 + 2.00\text{E}+09} \\ &= 9.75\text{E}+08 \text{ N/m}^2 \end{aligned}$$

- menentukan kekakuan vertikal elastomer

$$\begin{aligned} K_v &= \frac{E_c \times A_b}{t_r} \\ &= \frac{9.75\text{E}+08 \times 0.28278}{0.2} \\ &= 1378135851 \text{ N/m} \end{aligned}$$

- menentukan ketebalan rubber

$$\begin{aligned} t &= \frac{\phi b}{4 S} \\ &= \frac{0.60}{4 \times 15.0448434} \\ &= 0.00997019 \text{ m} \end{aligned}$$

jumlah layer (n)

$$\begin{aligned} n \times t &= t_r \\ n &= \frac{t_r}{t} \\ &= \frac{0.2}{0.00997} \\ &= 20.05979 \sim n = 20 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 t_{\text{baru}} &= \frac{t_r}{n} \\
 &= \frac{0.2}{20} \\
 &= 0.01 \text{ m}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 S_{\text{baru}} &= \frac{\phi b}{4 \times t_{\text{baru}}} \\
 &= \frac{0.6}{4 \times 0.01} \\
 &= 15
 \end{aligned}$$

- menentukan dimensi elastomer

tinggi elastomer :

$$\begin{aligned}
 H &= 2 \times 0.025 + 0.2 + (n - 1) \times 0.003 \\
 &= 0.307 \text{ meter}
 \end{aligned}$$

Lebar elastomer :

$$\begin{aligned}
 L &= \phi b - (2 \times 0.005) \\
 &= 0.60 - 2 \times 0.005 \\
 &= 0.59 \text{ meter}
 \end{aligned}$$

- menentukan nilai buckling loads (*safety factor*)

$$\begin{aligned}
 R &= \frac{\phi b}{2} \\
 &= \frac{0.60}{2} \\
 &= 0.30 \text{ meter}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I &= \frac{1}{4} \pi R^4 \\
 &= \frac{1}{4} \times 3.142 \times 0.3^4 \\
 &= 0.00636255 \text{ m}^4
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_s &= \frac{1}{4} \pi L^2 \\
 &= 0.273433 \text{ m}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_{critis} &= \frac{\pi}{tr} \times \sqrt{\frac{E_c \times I \times G0.2 \times A_s}{3}} \\
 &= 13975165.32 \text{ N}
 \end{aligned}$$

- menentukan rollout displacement

$$\begin{aligned}
 D_{max} &= \frac{\phi b}{1 + K_{hb} \times \frac{H}{W_k}} \\
 &= \frac{0.6}{1 + 1.4E+06 \times \frac{0.307}{4997518.03}} \\
 &= 0.55205076 \text{ meter}
 \end{aligned}$$

Dari perhitungan diatas didapatkan dimensi *elastomeric rubber bearing* sebagai berikut :

Tinggi Bantalan (H) = 0.307 m

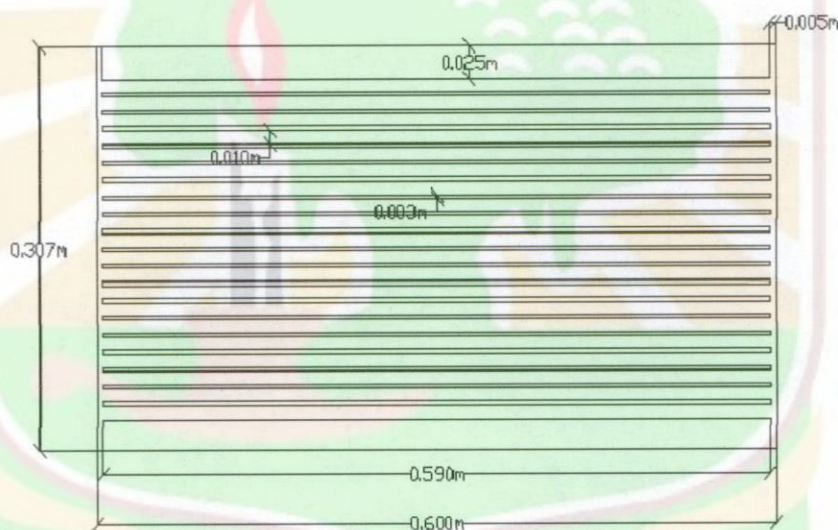
Lebar Bantalan (L) = 0.59 m

Diameter Bantalan (ϕ) = 0.6 m

Jumlah Layer (n) = 20

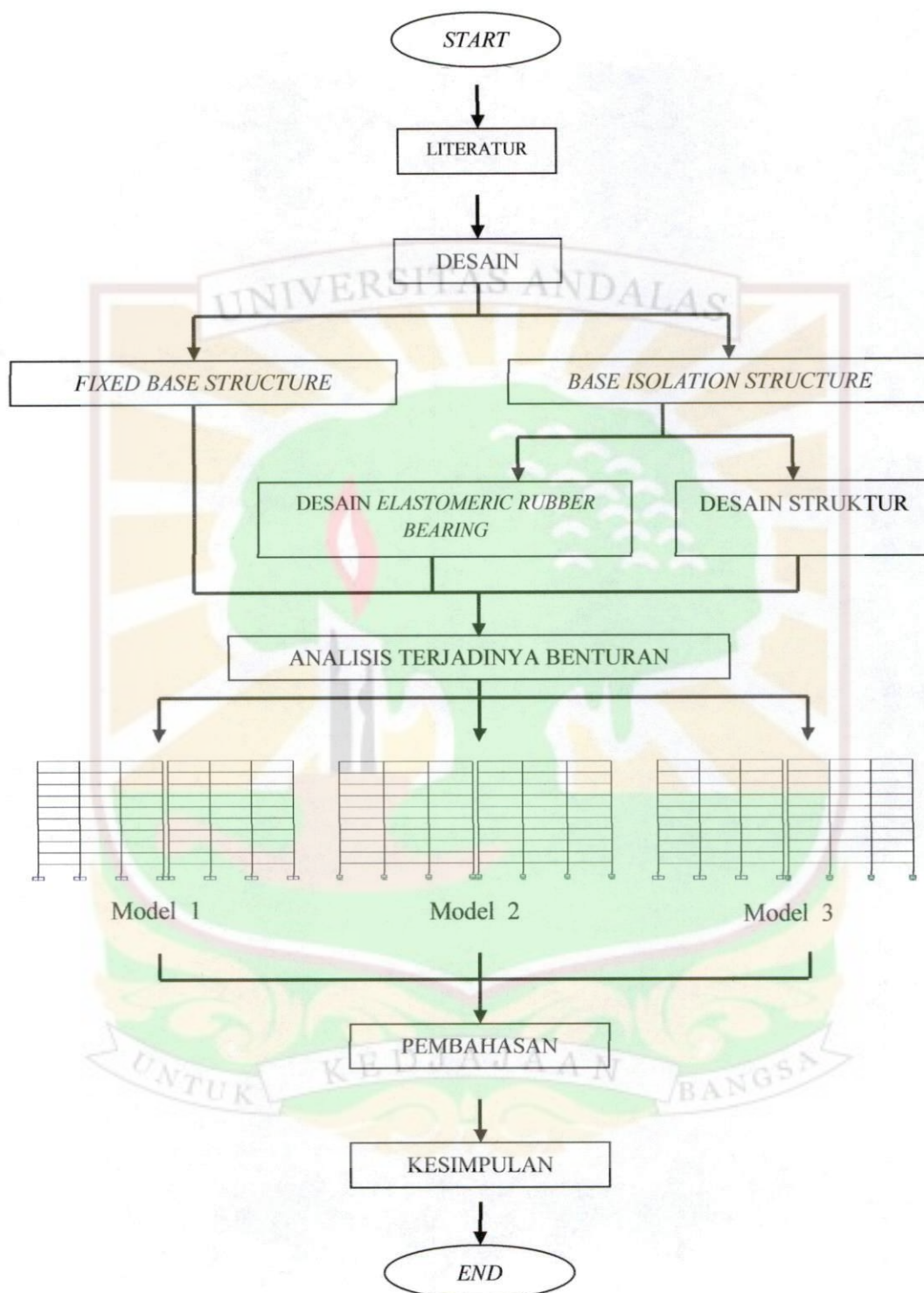
Tebal lempengan baja = 0.003 m

Tebal Rubber = 0.01 m



Gambar 3.4 Dimensi elastomer hasil desain (non skala)

Adapun langkah-langkah yang perlu dilakukan dalam metodologi penelitian dapat dilihat dalam *flowchart* dibawah ini



Gambar 3.5 Skema prosedur penyelesaian studi

BAB IV

ANALISIS HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Input Beban Eksitasi

Eksitasi gempa El Centro NS 1940 dengan durasi 30 detik diberikan untuk melihat perilaku struktur terhadap beban dinamik.



Gambar 4.1 Grafik percepatan gempa El Centro

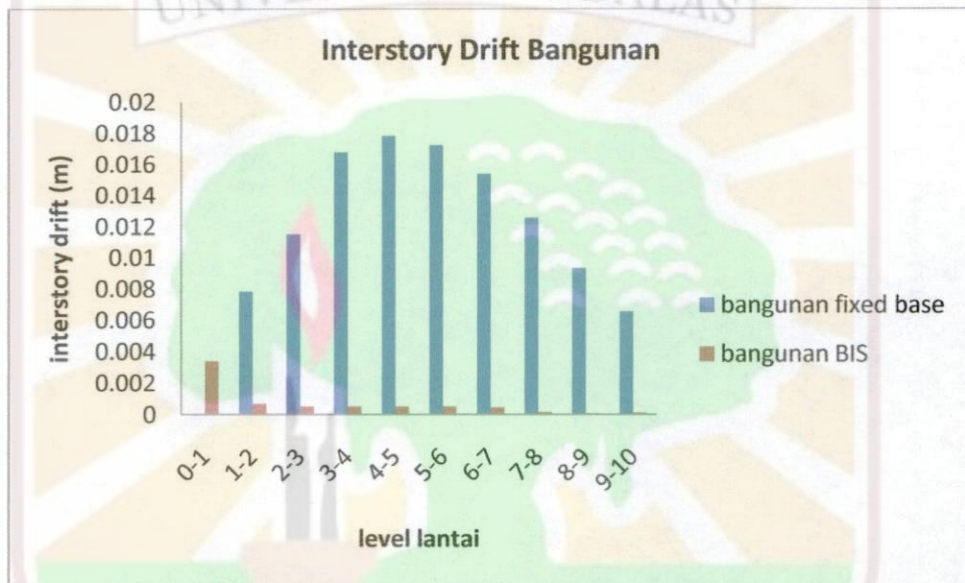
Untuk mengetahui respon struktur terhadap benturan antar gedung masing-masing model akan dianalisis untuk mendapatkan :

- *history displacement* pada lantai masing-masing gedung
- *history displacement* pada titik kontak antar gedung

4.2 Interstory Drift Bangunan

Interstory drift bangunan *base isolation* relatif lebih kecil daripada bangunan *fixed base*, dimana nilainya hanya 16 % jika dibandingkan dengan

bangunan *fixed base* yang mencapai 84% terhadap *interstory drift* maksimum gedung. Pada lantai dasar bangunan *base isolation* memiliki *interstory drift* yang lebih besar dari bangunan *fixed base*, hal ini disebabkan karena pada bangunan *base isolation*, bantalan elastomer sangat fleksibel dalam arah horizontal atau memiliki kekakuan horizontal yang sangat kecil yang dapat memungkinkan terjadinya perpindahan pada dasar gedung.



Gambar 4.2 Grafik perbandingan *interstory drift* bangunan *fixed base* dengan bangunan *base isolation system*

Jika dilihat dari grafik diatas, *Interstory drift* bangunan dengan *base isolation* relatif menurun untuk semakin tingginya lantai bangunan, sedangkan pada bangunan *fixed base*, *interstory drift* terbesar terjadi pada lantai 4-5.

4.3 Deformasi Titik Kontak Antar Gedung

Hasil analisis pada model 1, jika dilihat dari deformasi maksimum gedung yang terjadi, kedua gedung yang berdekatan tidak mengalami *pounding* dimana deformasi gedung A adalah 0.12 m sedangkan gedung B adalah 0.13 m. Sehingga

dengan jarak yang disyaratkan oleh peraturan SNI gedung sebesar 1 meter masih aman digunakan untuk menghindari *pounding* pada bangunan *fixed base*. Riwayat perpindahan titik kontak lantai 10 model 1 dapat dilihat pada gambar 4.3 dibawah ini, dari gambar dapat disimpulkan bahwa grafik merupakan grafik transien dengan periode hanya 40 detik untuk sampai keposisi semula, dan memiliki frekuensi getar yang besar yang menyebabkan perpindahan gedung secara bolak-balik yang cukup banyak untuk periode 40 detik.



Gambar 4.3 Perpindahan pada titik kontak model 1

Hasil analisis pada model 2, jika dilihat dari deformasi maksimum gedung dan bantalan isolator yang terjadi, kedua gedung yang berdekatan tidak mengalami *pounding* dimana deformasi gedung dan bantalan adalah sama-sama 0.16 m. Ini berarti bahwa posisi gedung tetap stabil diatas bantalan walaupun adanya pergerakan tanah. Hal ini disebabkan karena penggunaan isolator dapat meminimalisir perpindahan gedung. Sehingga dengan jarak yang disyaratkan oleh peraturan SNI gedung sebesar 1 meter masih aman digunakan untuk menghindari *pounding* pada bangunan *fixed base*.

Jika dianalisis dari *Rollout Displacement* bantalan isolator yang besarnya mencapai 0.55 m, maka pada kedua gedung yang menggunakan base isolator akan saling berbenturan atau terjadi *pounding* jika kedua gedung bergerak saling mendekati satu sama lainnya. Oleh karena itu, jarak yang disyaratkan oleh peraturan SNI gedung sebesar 1 meter sudah tidak aman digunakan untuk menghindari *pounding* pada bangunan *base isolation*.

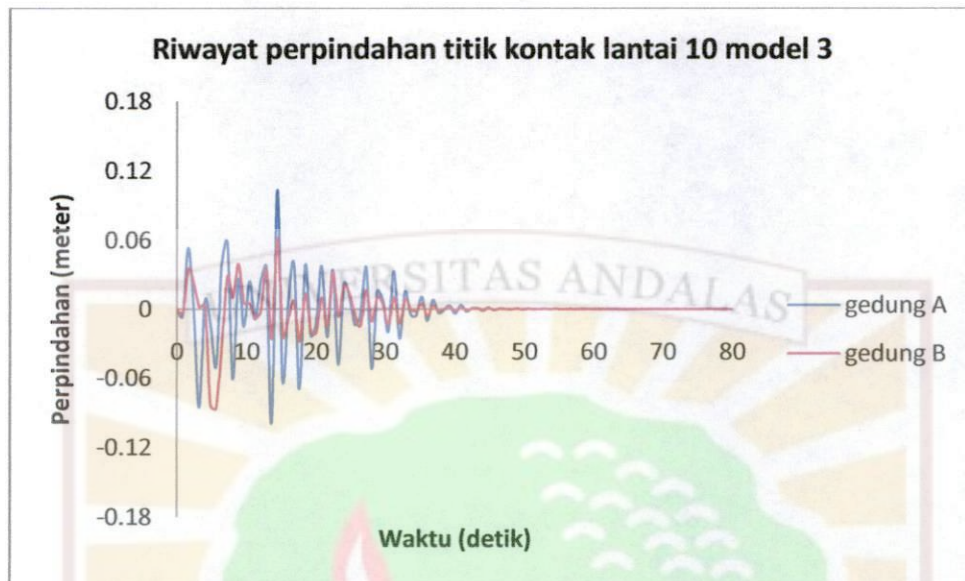


Gambar 4.4 Perpindahan pada titik kontak model 2

Dari gambar diatas terlihat bahwa bangunan *base isolation* memiliki perioda getar lebih panjang dan frekuensi getar lebih kecil dibandingkan dengan bangunan *fixed base*. Hal ini menyebabkan pergerakan gedung lebih stabil. Ini membuktikan bahwa penggunaan base isolation dapat memperpanjang perioda getar gedung saat terjadinya gempa.

Pada model 3, kedua gedung juga tidak mengalami benturan meskipun dilihat dari *rollout displacement* bantalan isolator sebesar 0.55 cm, hal ini dikarenakan deformasi maksimum yang terjadi pada gedung fixed base hanya

0.11 m. Oleh karena itu dengan jarak pemisah yang disyaratkan oleh SNI gedung sebesar 1m masih memungkinkan untuk menghindari benturan.



Gambar 4.5 Perpindahan titik kontak model

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dalam penelitian ini telah dianalisis 3 permodelan struktur yang diberi beban gempa El Centro. Hasil Studi memperlihatkan pengaruh perpindahan dan penggunaan base isolator terhadap jarak antar gedung agar tidak terjadi benturan.

Dari hasil dapat disimpulkan bahwa :

1. Semakin besar perpindahan yang terjadi dan semakin kecil jarak pemisah antar gedung maka kemungkinan terjadinya benturan akan semakin besar.
2. Pada bangunan *fixed base* dan bangunan yang salah satunya menggunakan base isolation, jarak antar gedung yang disyaratkan 0.025 tinggi bangunan masih aman digunakan untuk menghindari pounding.
3. Pada bangunan base isolation, jika dianalisis dari *rollout displacement* bantalan isolatornya, maka jarak antar gedung yang disyaratkan tidak memenuhi untuk menghindari pounding.

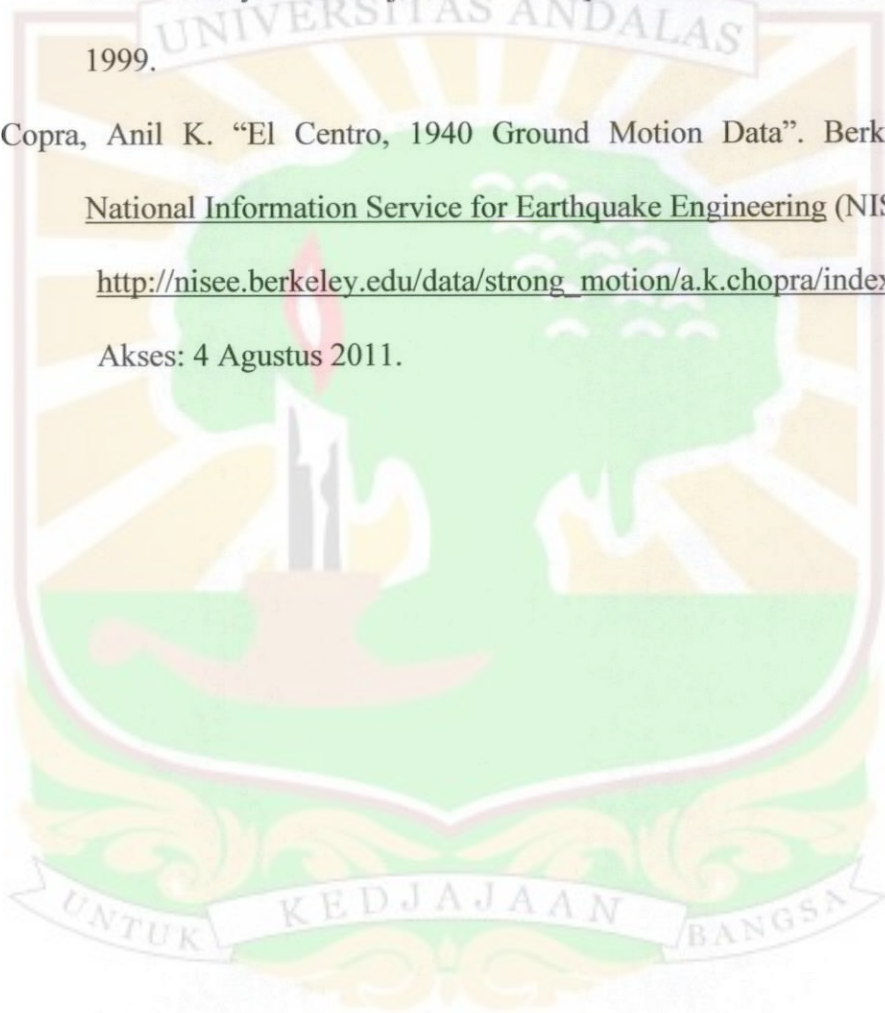
5.2 Saran

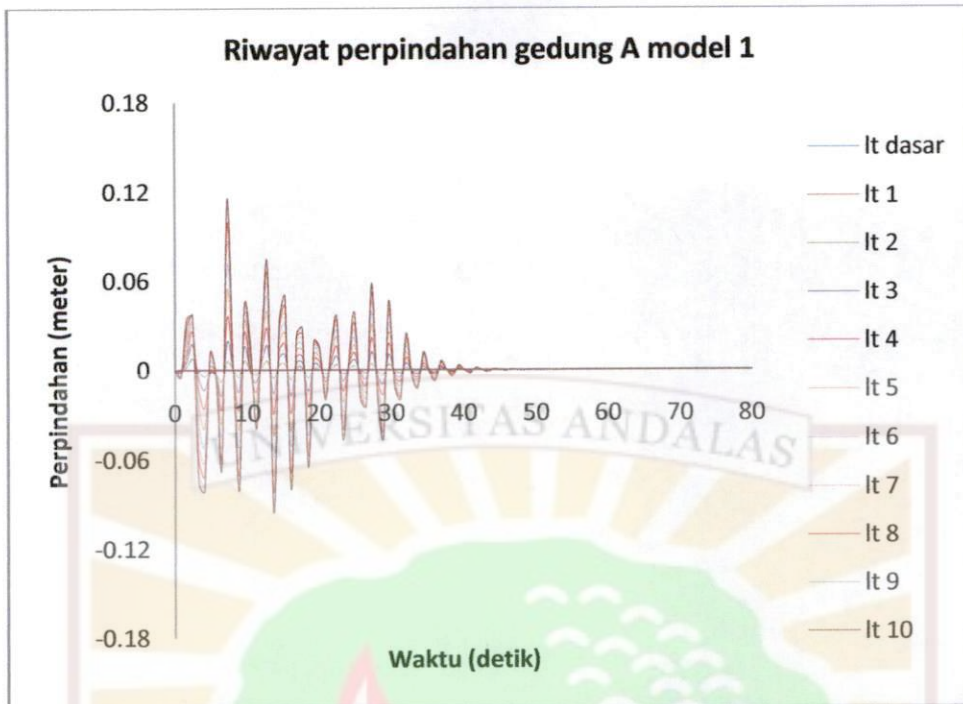
Penelitian ini hanya menganalisis pengaruh penggunaan base isolator terhadap jarak antar gedung yang disyaratkan dengan tipe isolator yang sama. Oleh sebab itu disarankan untuk studi selanjutnya analisis dilakukan dengan membandingkan penggunaan base isolator dengan tipe yang bervariasi. Sehingga penerapan prinsip isolator pada bangunan dapat diketahui lebih detail.

DAFTAR PUSTAKA

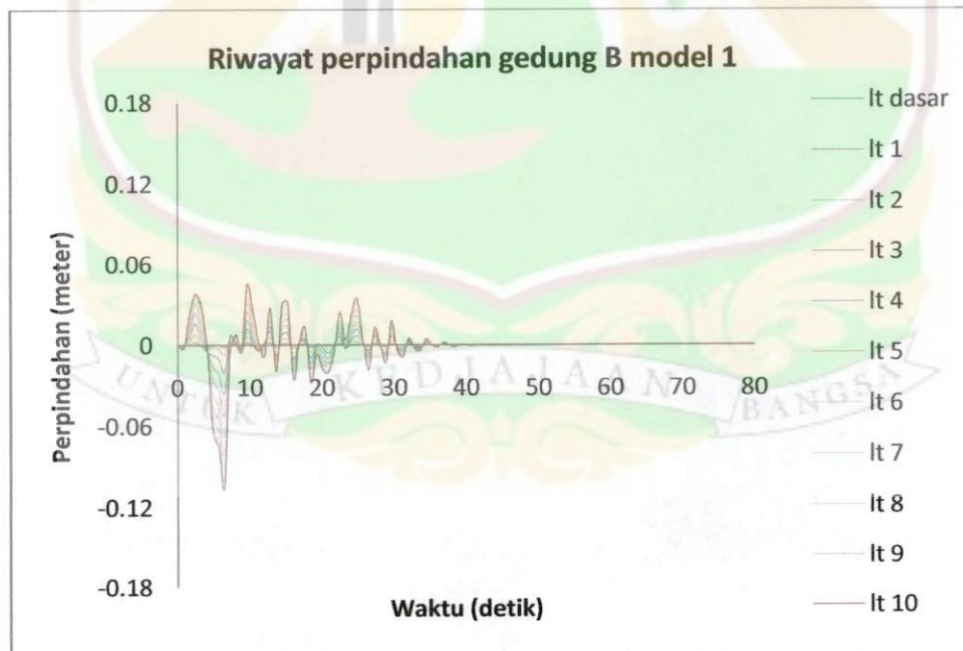
1. Sudarmono.” Simulasi Numerik Benturan Dua Struktur Tiga Dimensi Dibawah Beban Dinamik.” Tesis. Bandung : Program Pascasarjana ITB, 1999.
2. Agarwal, Vivek Kumar. “ *Pounding and Impact of Base Isolated Buildings Due To Earthquakes.*” Tesis. Texas : Master of Science A&M University, 2004.
3. Ivo, Astri.” Perhitungan Parameter *Dynamic Absorber* Berbasis Respon Amplitudo Sebagai Kontrol Vibrasi Arah Horizontal Pada Gedung Akibat Pengaruh Gerakan Tanah” Skripsi. Surabaya : ITS, t.th.
4. Departemen Permukiman dan Prasarana Sarana Wilayah. “ Standar Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung.” SNI – 1726 – 2002. Bandung : t.p, 2002.
5. Naeim, F., and Kelly, J.M. (1999), “*Desaign of Seismic Isolated Structures : from Theory to Practice*”, University of California, Berkeley, CA.
6. Harini, Restu. “Analisa Pengaruh Penggunaan *Elastomeric Hollow Rubber Bearing* Dengan Menggunakan Materialnon Elastis” Skripsi. Padang : Unand, 2009.
7. Kementrian Pekerjaan Umum. “Peta *hazard* gempa indonesia 2010 Sebagai Acuan Dasar Perencanaan dan Perancangan Infrastruktur Tahan Gempa”. Jakarta : t.p, 2010.

8. Suryanita, Reni. "Benturan Dua Struktur Portal yang dimodelkan Sebagai MDoF Diskret dibawah Beban Dinamik" Tesis. Bandung : Program Pascasarjana ITB, 1998.
9. Lumantarna, Benjamin. Kurniawan Sutanto Dkk. "gempa rencana untuk analisa riwayat waktu" jurnal teknik sipil. Universitas Kristen Petra, 1999.
10. Copra, Anil K. "El Centro, 1940 Ground Motion Data". Berkeley : National Information Service for Earthquake Engineering (NISEE).
http://nisee.berkeley.edu/data/strong_motion/a.k.chopra/index.html
Akses: 4 Agustus 2011.

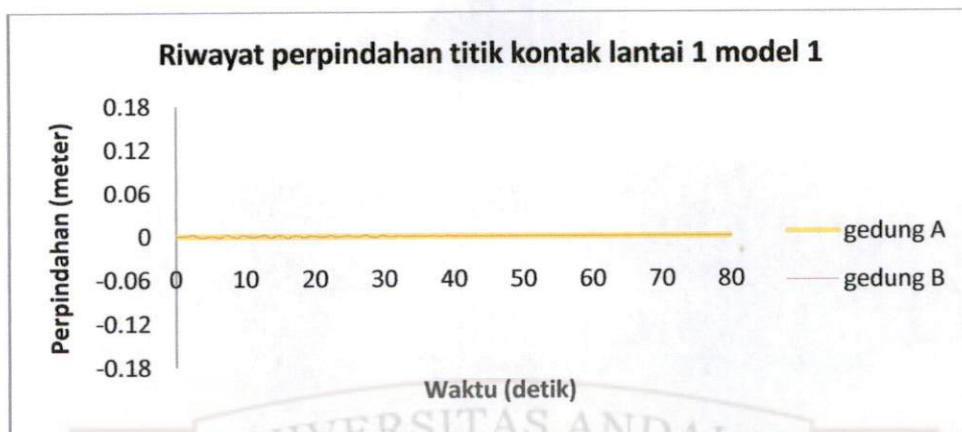




Grafik 1 : Riwayat perpindahan seluruh lantai gedung A model 1



Grafik 2 : Riwayat perpindahan seluruh lantai gedung B model 1



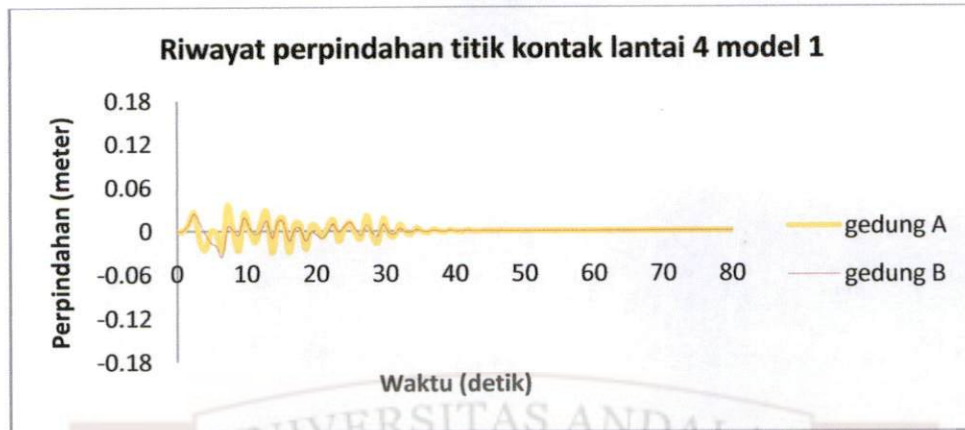
Grafik 3 : Riwayat perpindahan titik kontak lantai 1 model 1



Grafik 4 : Riwayat perpindahan titik kontak lantai 2 model 1



Grafik 5 : Riwayat perpindahan titik kontak lantai 3 model 1



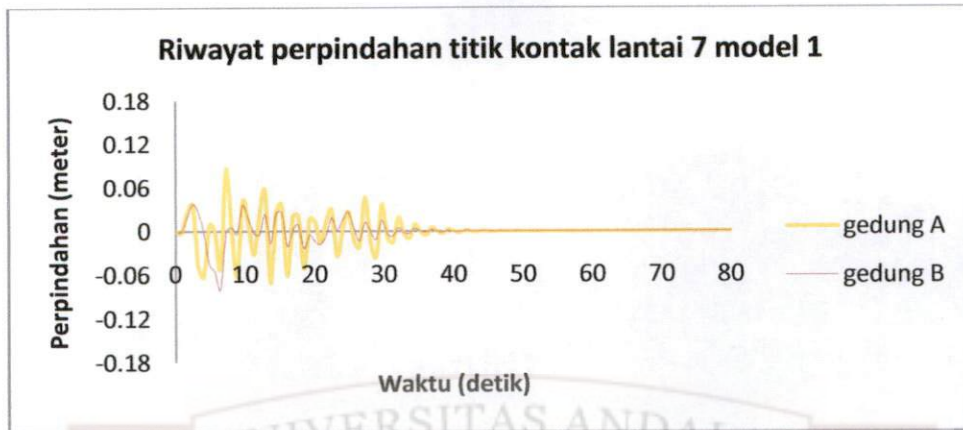
Grafik 6 : Riwayat perpindahan titik kontak lantai 4 model 1



Grafik 7 : Riwayat perpindahan titik kontak lantai 5 model 1



Grafik 8 : Riwayat perpindahan titik kontak lantai 6 model 1



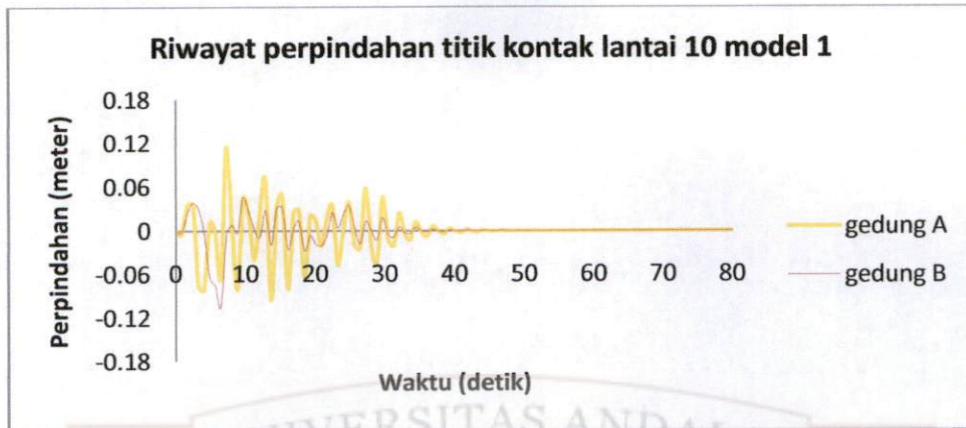
Grafik 9 : Riwayat perpindahan titik kontak lantai 7 model 1



Grafik 10 : Riwayat perpindahan titik kontak lantai 8 model 1

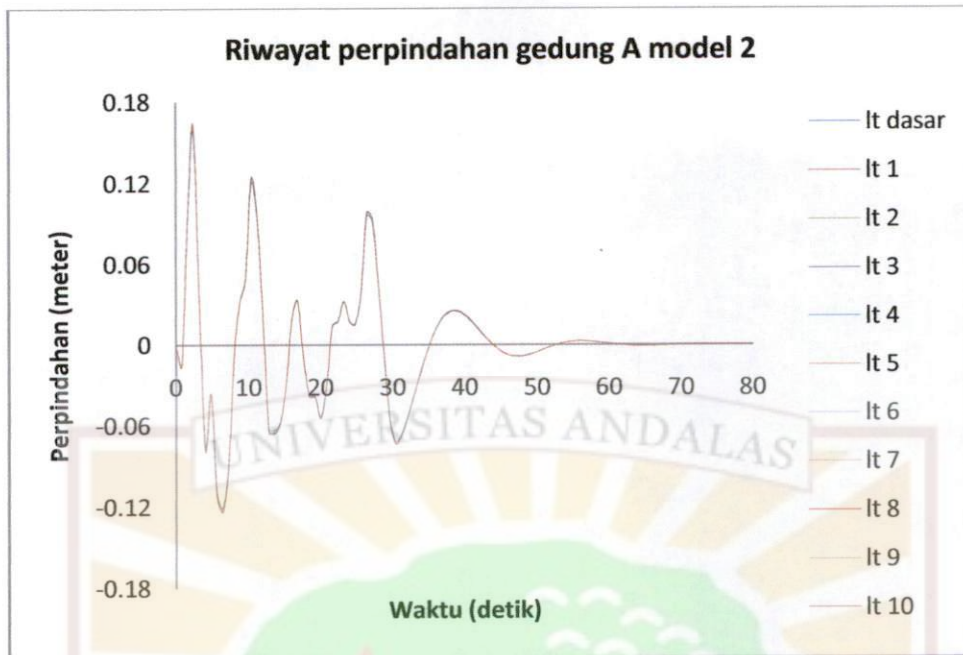


Grafik 11 : Riwayat perpindahan titik kontak lantai 9 model 1

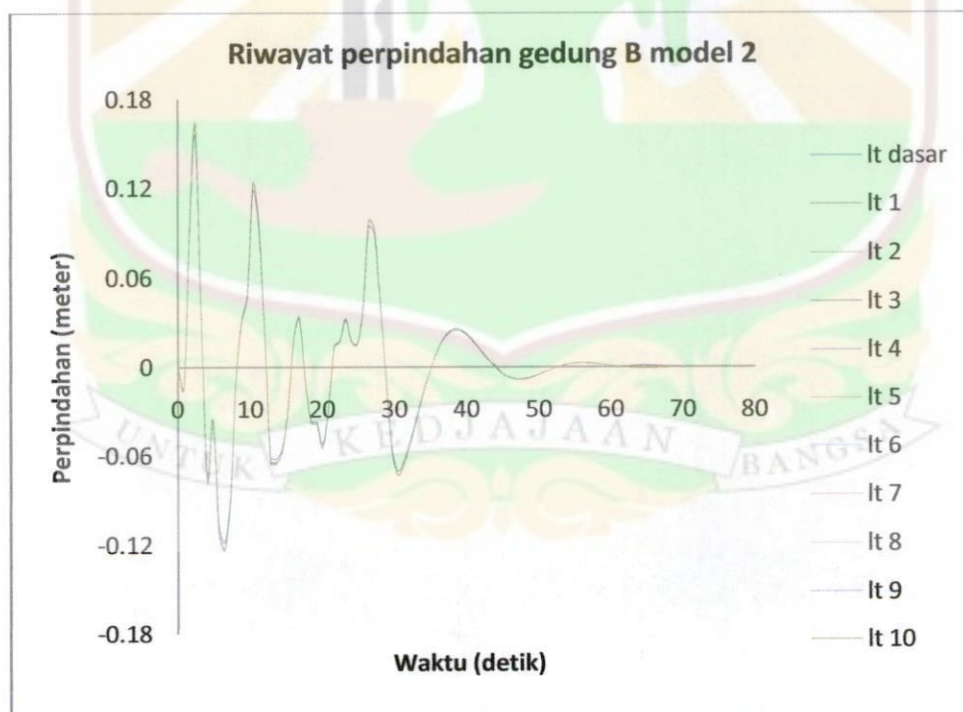


Grafik 12 : Riwayat perpindahan titik kontak lantai 10 model 1

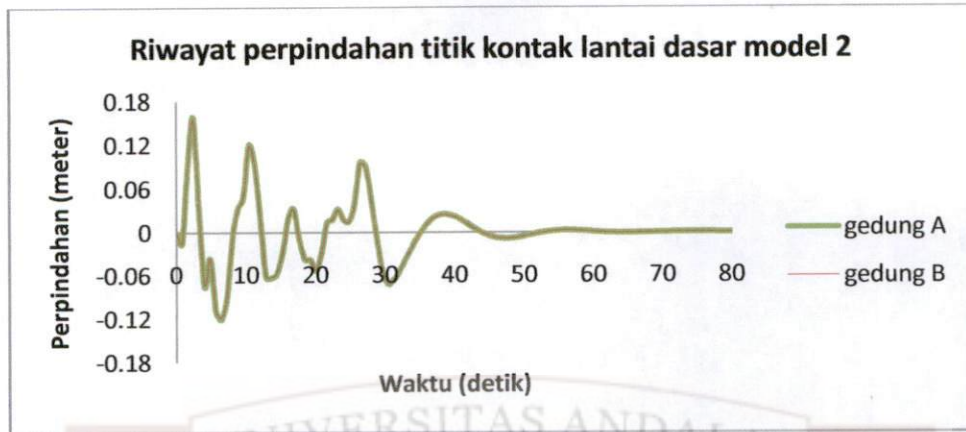




Grafik 13 : Riwayat perpindahan seluruh lantai gedung A model 2



Grafik 14 : Riwayat perpindahan seluruh lantai gedung B model 2



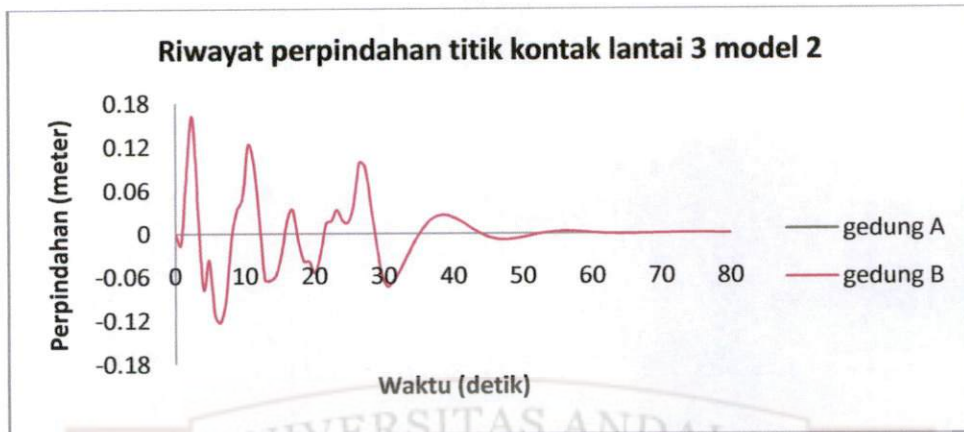
Grafik 15 : Riwayat perpindahan titik kontak lantai dasar model 2



Grafik 16 : Riwayat perpindahan titik kontak lantai 1 model 2



Grafik 17 : Riwayat perpindahan titik kontak lantai 2 model 2



Grafik 18 : Riwayat perpindahan titik kontak lantai 3 model 2



Grafik 19: Riwayat perpindahan titik kontak lantai 4 model 2



Grafik 20 : Riwayat perpindahan titik kontak lantai 5 model 2



Grafik 21 : Riwayat perpindahan titik kontak lantai 6 model 2



Grafik 22 : Riwayat perpindahan titik kontak lantai 7 model 2



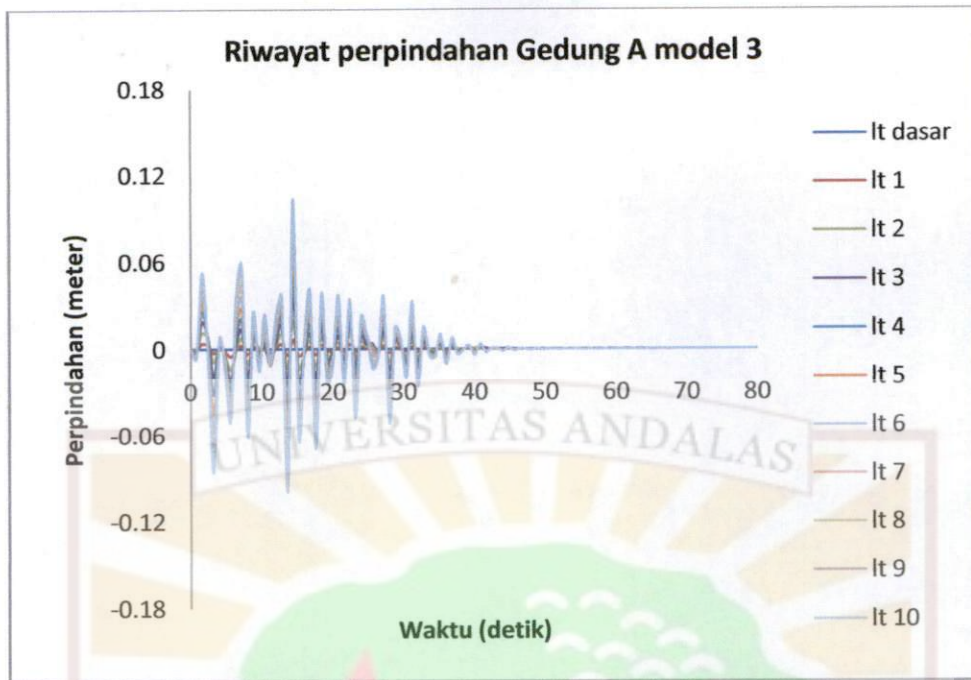
Grafik 23 : Riwayat perpindahan titik kontak lantai 8 model 2



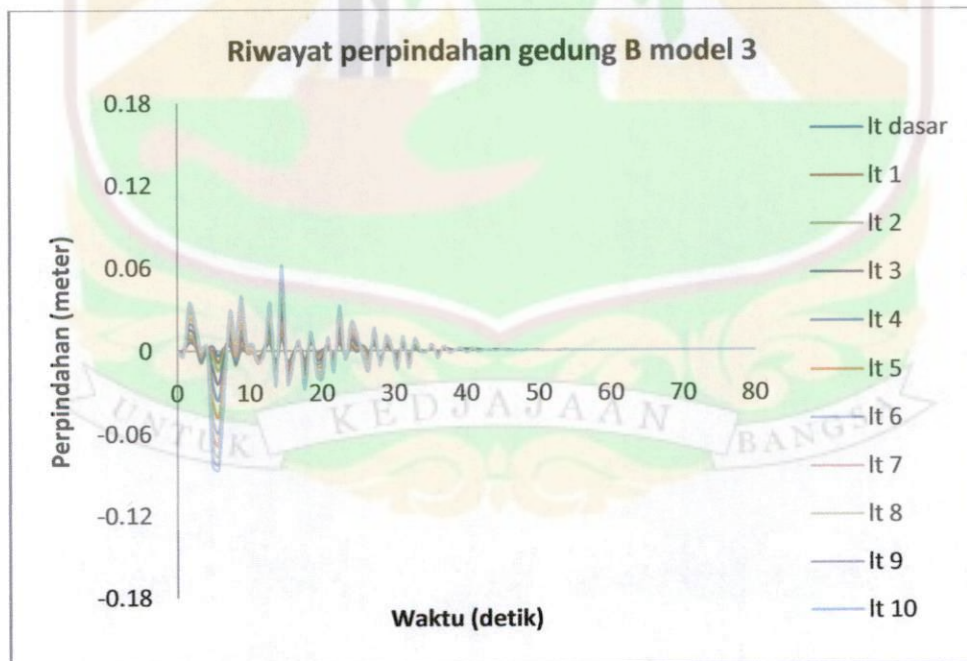
Grafik 24: Riwayat perpindahan titik kontak lantai 9 model 2



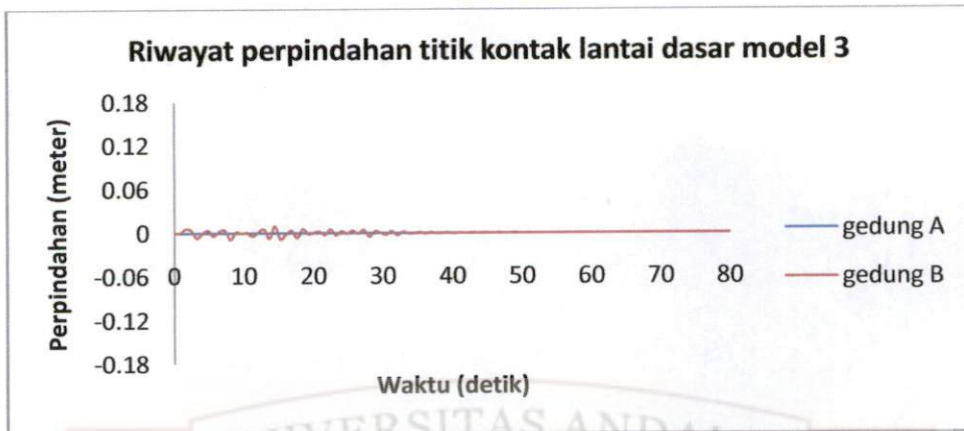
Grafik 25 : Riwayat perpindahan titik kontak lantai 10 model 2



Grafik 26 : Riwayat perpindahan seluruh lantai gedung A model 3



Grafik 27 : Riwayat perpindahan seluruh lantai gedung B model 3



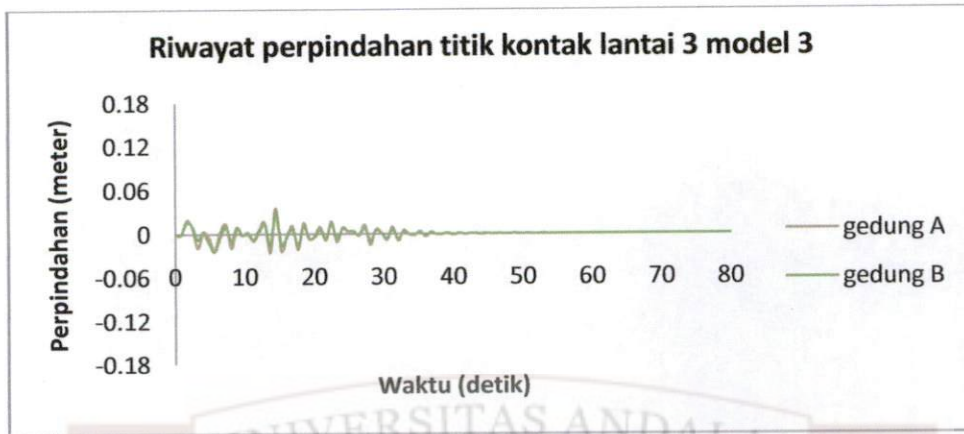
Grafik 28 : Riwayat perpindahan titik kontak lantai dasar model 3



Grafik 29 : Riwayat perpindahan titik kontak lantai 1 model 3



Grafik 30 : Riwayat perpindahan titik kontak lantai 2 model 3



Grafik 31 : Riwayat perpindahan titik kontak lantai 3 model 3



Grafik 32 : Riwayat perpindahan titik kontak lantai 4 model 3



Grafik 33 : Riwayat perpindahan titik kontak lantai 5 model 3



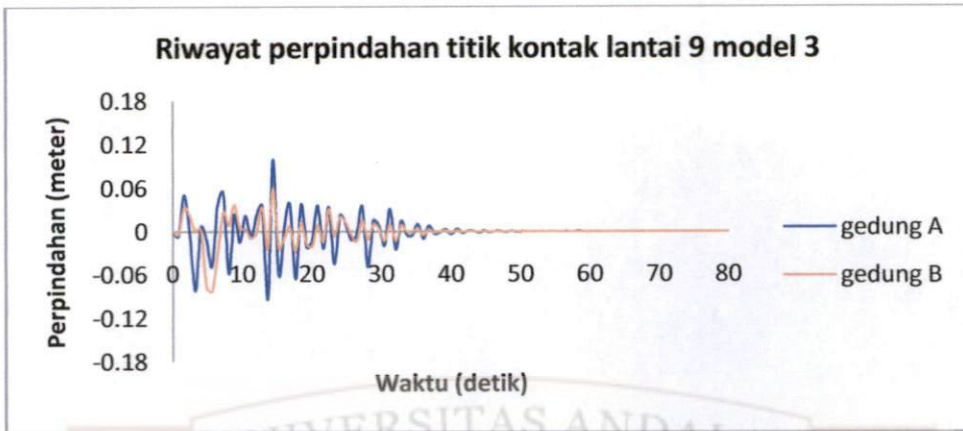
Grafik 34 : Riwayat perpindahan titik kontak lantai 6 model 3



Grafik 35 : Riwayat perpindahan titik kontak lantai 7 model 3



Grafik 36 : Riwayat perpindahan titik kontak lantai 8 model 3



Grafik 37 : Riwayat perpindahan titik kontak lantai 9 model 3



Grafik 38 : Riwayat perpindahan titik kontak lantai 10 model 3

TABLE: Element Deformations - Links untuk model 2

Link	LinkElem	OutputCase	CaseType	StepType	StepNum	U1	U2	U3	R1	R2	R3
Text	Text	Text	Text	Text	Unitless	m	m	m	Radians	Radians	Radians
1	1	MODAL	LinModal	Mode	1	-8.54E-06	-0.001784	0	0	0	-0.000067
1	1	MODAL	LinModal	Mode	2	0.000037	-0.001056	0	0	0	0.000029
1	1	MODAL	LinModal	Mode	3	0.000052	-0.003841	0	0	0	0.000059
1	1	MODAL	LinModal	Mode	4	0.00002	0.004938	0	0	0	-0.000446
1	1	MODAL	LinModal	Mode	5	0.000025	-0.003748	0	0	0	0.000384
1	1	MODAL	LinModal	Mode	6	-0.000126	0.008317	0	0	0	-0.001325
1	1	MODAL	LinModal	Mode	7	-0.00004	-0.001272	0	0	0	0.000341
1	1	MODAL	LinModal	Mode	8	0.00003	0.011258	0	0	0	-0.002234
1	1	MODAL	LinModal	Mode	9	0.000982	0.000089	0	0	0	-0.000024
1	1	MODAL	LinModal	Mode	10	-0.001753	0.000021	0	0	0	0.000011
1	1	elentro	NonModHist	Max		0.00008	0.163691	0	0	0	0.001034
1	1	elentro	NonModHist	Min		-0.000059	-0.127998	0	0	0	-0.000785
2	2	MODAL	LinModal	Mode	1	-3.12E-07	-0.001803	0	0	0	-0.000062
2	2	MODAL	LinModal	Mode	2	1.78E-06	-0.001048	0	0	0	0.000027
2	2	MODAL	LinModal	Mode	3	2.60E-06	-0.003817	0	0	0	0.000053
2	2	MODAL	LinModal	Mode	4	3.13E-06	0.00479	0	0	0	-0.000409
2	2	MODAL	LinModal	Mode	5	7.87E-07	-0.003611	0	0	0	0.000349
2	2	MODAL	LinModal	Mode	6	-7.69E-06	0.007853	0	0	0	-0.001205
2	2	MODAL	LinModal	Mode	7	-6.06E-06	-0.001121	0	0	0	0.000301
2	2	MODAL	LinModal	Mode	8	0.000013	0.010377	0	0	0	-0.002
2	2	MODAL	LinModal	Mode	9	0.002041	0.000085	0	0	0	-0.000023
2	2	MODAL	LinModal	Mode	10	-0.001467	0.000269	0	0	0	-0.000056
2	2	elentro	NonModHist	Max		0.000065	0.163771	0	0	0	0.001023
2	2	elentro	NonModHist	Min		-0.00005	-0.128049	0	0	0	-0.000777
3	3	MODAL	LinModal	Mode	1	3.12E-07	-0.001803	0	0	0	-0.000062
3	3	MODAL	LinModal	Mode	2	-1.78E-06	-0.001048	0	0	0	0.000027
3	3	MODAL	LinModal	Mode	3	-2.60E-06	-0.003817	0	0	0	0.000053
3	3	MODAL	LinModal	Mode	4	-3.13E-06	0.00479	0	0	0	-0.000409
3	3	MODAL	LinModal	Mode	5	-7.87E-07	-0.003611	0	0	0	0.000349
3	3	MODAL	LinModal	Mode	6	7.69E-06	0.007853	0	0	0	-0.001205

3	3	MODAL	LinModal	Mode	7	6.06E-06	-0.001121	0	0	0	0.000301
3	3	MODAL	LinModal	Mode	8	-0.000013	0.010377	0	0	0	-0.002
3	3	MODAL	LinModal	Mode	9	0.002041	-0.000085	0	0	0	0.000023
3	3	MODAL	LinModal	Mode	10	0.001467	0.000269	0	0	0	-0.000056
3	3	elentro	NonModHist	Max		0.00005	0.163771	0	0	0	0.001023
3	3	elentro	NonModHist	Min		-0.000065	-0.128049	0	0	0	-0.000777
4	4	MODAL	LinModal	Mode	1	8.54E-06	-0.001784	0	0	0	-0.000067
4	4	MODAL	LinModal	Mode	2	-0.000037	-0.001056	0	0	0	0.000029
4	4	MODAL	LinModal	Mode	3	-0.000052	-0.003841	0	0	0	0.000059
4	4	MODAL	LinModal	Mode	4	-0.00002	0.004938	0	0	0	-0.000446
4	4	MODAL	LinModal	Mode	5	-0.000025	-0.003748	0	0	0	0.000384
4	4	MODAL	LinModal	Mode	6	0.000126	0.008317	0	0	0	-0.001325
4	4	MODAL	LinModal	Mode	7	0.00004	-0.001272	0	0	0	0.000341
4	4	MODAL	LinModal	Mode	8	-0.00003	0.011258	0	0	0	-0.002234
4	4	MODAL	LinModal	Mode	9	0.000982	-0.000089	0	0	0	0.000024
4	4	MODAL	LinModal	Mode	10	0.001753	0.000021	0	0	0	0.000011
4	4	elentro	NonModHist	Max		0.000059	0.163691	0	0	0	0.001034
4	4	elentro	NonModHist	Min		-0.00008	-0.127998	0	0	0	-0.000785
5	5	MODAL	LinModal	Mode	1	-5.19E-06	-0.00194	0	0	0	-0.000049
5	5	MODAL	LinModal	Mode	2	-0.000031	-0.000464	0	0	0	-0.000024
5	5	MODAL	LinModal	Mode	3	0.000061	-0.003813	0	0	0	0.00005
5	5	MODAL	LinModal	Mode	4	-0.000025	0.002421	0	0	0	-0.000165
5	5	MODAL	LinModal	Mode	5	-0.000039	-0.004182	0	0	0	0.000393
5	5	MODAL	LinModal	Mode	6	-0.000024	0.001164	0	0	0	-0.000313
5	5	MODAL	LinModal	Mode	7	0.000151	-0.007983	0	0	0	0.00136
5	5	MODAL	LinModal	Mode	8	0.000078	-0.009716	0	0	0	0.001471
5	5	MODAL	LinModal	Mode	9	2.97E-11	3.08E-09	0	0	0	-1.76E-09
5	5	MODAL	LinModal	Mode	10	-2.82E-06	-0.002447	0	0	0	0.000514
5	5	elentro	NonModHist	Max		0.000013	0.16067	0	0	0	0.001666
5	5	elentro	NonModHist	Min		-0.000017	-0.125587	0	0	0	-0.001284
6	6	MODAL	LinModal	Mode	1	-7.63E-08	-0.001952	0	0	0	-0.000046
6	6	MODAL	LinModal	Mode	2	-8.82E-07	-0.000461	0	0	0	-0.000025
6	6	MODAL	LinModal	Mode	3	2.76E-06	-0.003798	0	0	0	0.000046

6	6	MODAL	LinModal	Mode	4	-2.25E-06	0.002347	0	0	0	-0.000146
6	6	MODAL	LinModal	Mode	5	-6.91E-06	-0.004091	0	0	0	0.00037
6	6	MODAL	LinModal	Mode	6	-4.75E-06	0.001001	0	0	0	-0.000271
6	6	MODAL	LinModal	Mode	7	-3.00E-06	-0.00768	0	0	0	0.001281
6	6	MODAL	LinModal	Mode	8	-0.00002	-0.009486	0	0	0	0.00141
6	6	MODAL	LinModal	Mode	9	1.49E-10	3.42E-09	0	0	0	-1.87E-09
6	6	MODAL	LinModal	Mode	10	-8.58E-06	-0.002294	0	0	0	0.000473
6	6	elentro	NonModHist	Max		9.05E-06	0.160886	0	0	0	0.001615
6	6	elentro	NonModHist	Min		-0.000011	-0.12575	0	0	0	-0.001245
7	7	MODAL	LinModal	Mode	1	1.85E-07	-0.002036	0	0	0	-0.00002
7	7	MODAL	LinModal	Mode	2	1.49E-06	-0.000933	0	0	0	0.000122
7	7	MODAL	LinModal	Mode	3	-3.03E-06	-0.003586	0	0	0	-0.000019
7	7	MODAL	LinModal	Mode	4	1.13E-06	0.003169	0	0	0	-0.000401
7	7	MODAL	LinModal	Mode	5	4.35E-06	-0.002247	0	0	0	-0.000202
7	7	MODAL	LinModal	Mode	6	1.33E-06	0.003244	0	0	0	-0.000968
7	7	MODAL	LinModal	Mode	7	-0.000011	0.000027	0	0	0	-0.001113
7	7	MODAL	LinModal	Mode	8	-5.30E-06	0.003035	0	0	0	-0.002479
7	7	MODAL	LinModal	Mode	9	-9.14E-10	1.83E-10	0	0	0	-8.65E-10
7	7	MODAL	LinModal	Mode	10	1.48E-06	0.000068	0	0	0	-0.000261
7	7	elentro	NonModHist	Max		3.18E-06	0.167192	0	0	0	0.000279
7	7	elentro	NonModHist	Min		-2.51E-06	-0.130602	0	0	0	-0.000345
8	8	MODAL	LinModal	Mode	1	5.08E-06	-0.001939	0	0	0	-0.000049
8	8	MODAL	LinModal	Mode	2	0.00003	-0.000456	0	0	0	-0.000026
8	8	MODAL	LinModal	Mode	3	-0.000061	-0.003816	0	0	0	0.000051
8	8	MODAL	LinModal	Mode	4	0.000026	0.002406	0	0	0	-0.000161
8	8	MODAL	LinModal	Mode	5	0.000042	-0.004215	0	0	0	0.000402
8	8	MODAL	LinModal	Mode	6	0.000027	0.00112	0	0	0	-0.000302
8	8	MODAL	LinModal	Mode	7	-0.000139	-0.008155	0	0	0	0.001406
8	8	MODAL	LinModal	Mode	8	-0.000056	-0.010016	0	0	0	0.001551
8	8	MODAL	LinModal	Mode	9	2.63E-10	2.51E-09	0	0	0	-1.57E-09
8	8	MODAL	LinModal	Mode	10	7.66E-06	-0.002513	0	0	0	0.000532
8	8	elentro	NonModHist	Max		0.000025	0.160559	0	0	0	0.001694
8	8	elentro	NonModHist	Min		-0.000016	-0.125502	0	0	0	-0.001305

7	7	elentro	NonModHist	Max		0.000431	0.012257	0	0	0	0.001077
7	7	elentro	NonModHist	Min		-0.000334	-0.010606	0	0	0	-0.000895
8	8	DEAD	LinStatic			-0.019286	0.081775	0	0	0	-0.013223
8	8	MODAL	LinModal	Mode	1	-0.000007051	-0.00033	0	0	0	0.000017
8	8	MODAL	LinModal	Mode	2	0.000001864	0.000466	0	0	0	0.000001789
8	8	MODAL	LinModal	Mode	3	0.000055	-0.000277	0	0	0	-0.000513
8	8	MODAL	LinModal	Mode	4	0.000009562	0.000022	0	0	0	0.000012
8	8	MODAL	LinModal	Mode	5	-0.000102	-0.000122	0	0	0	0.000375
8	8	MODAL	LinModal	Mode	6	-0.000016	-0.000293	0	0	0	0.000365
8	8	MODAL	LinModal	Mode	7	-0.000029	-0.000789	0	0	0	0.000281
8	8	MODAL	LinModal	Mode	8	0.000012	0.000867	0	0	0	-0.000175
8	8	MODAL	LinModal	Mode	9	-0.000033	-0.000614	0	0	0	0.000213
8	8	MODAL	LinModal	Mode	10	-0.000035	-0.000069	0	0	0	-0.000011
8	8	live	LinStatic			-0.000011	-8.617E-07	0	0	0	0.000002488
8	8	elentro	NonModHist	Max		0.00033	0.013923	0	0	0	0.00071
8	8	elentro	NonModHist	Min		-0.000281	-0.011845	0	0	0	-0.000733

max	0.002041	0.167192
min	-0.019286	-0.130602

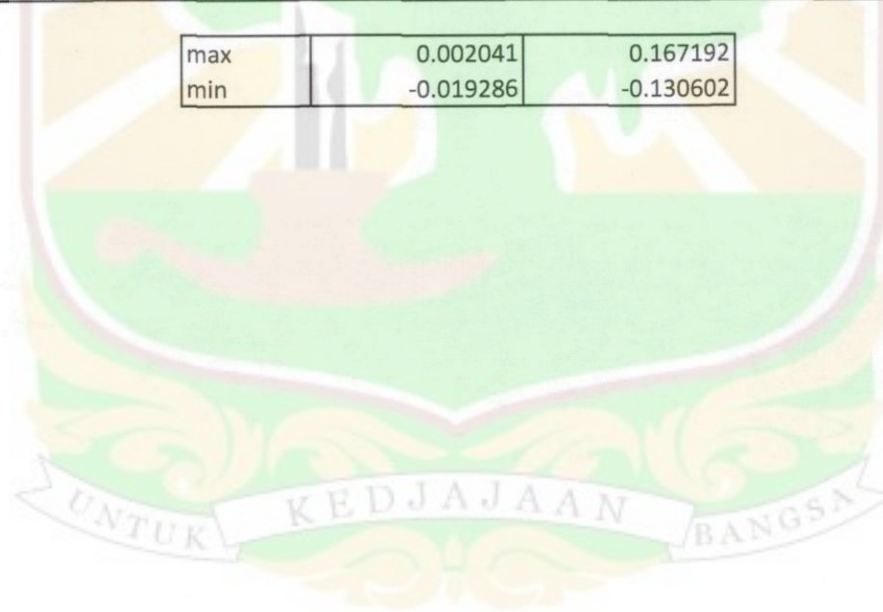


TABLE: Element Deformations - Links Model 3

Link	LinkElem	OutputCase	CaseType	StepType	StepNum	U1	U2	U3	R1	R2	R3
Text	Text	Text	Text	Text	Unitless	m	m	m	Radians	Radians	Radians
5	1	MODAL	LinModal	Mode	1	-0.000011	-0.000439	0	0	0	-0.000054
5	1	MODAL	LinModal	Mode	2	0.000047	-0.000244	0	0	0	0.000054
5	1	MODAL	LinModal	Mode	3	-0.000037	0.001904	0	0	0	0.000077
5	1	MODAL	LinModal	Mode	4	0.000055	0.000375	0	0	0	-0.000154
5	1	MODAL	LinModal	Mode	5	-2.75E-07	-0.00566	0	0	0	0.000347
5	1	MODAL	LinModal	Mode	6	-0.000056	0.008919	0	0	0	-0.00119
5	1	MODAL	LinModal	Mode	7	0.000162	-0.009368	0	0	0	0.001552
5	1	MODAL	LinModal	Mode	8	0.000047	0.013143	0	0	0	-0.002958
5	1	MODAL	LinModal	Mode	9	0.000949	0.000059	0	0	0	-0.000024
5	1	MODAL	LinModal	Mode	10	0.001674	0.001398	0	0	0	-0.00039
5	1	elentro	NonModHist	Max		0.000765	0.014573	0	0	0	0.001866
5	1	elentro	NonModHist	Min		-0.000627	-0.015353	0	0	0	-0.001573
6	2	MODAL	LinModal	Mode	1	-6.85E-07	-0.00046	0	0	0	-0.000049
6	2	MODAL	LinModal	Mode	2	1.72E-06	-0.000235	0	0	0	0.000052
6	2	MODAL	LinModal	Mode	3	-9.01E-07	0.001949	0	0	0	0.000066
6	2	MODAL	LinModal	Mode	4	5.74E-06	0.000347	0	0	0	-0.000147
6	2	MODAL	LinModal	Mode	5	-7.47E-06	-0.005633	0	0	0	0.00034
6	2	MODAL	LinModal	Mode	6	9.95E-06	0.008656	0	0	0	-0.001121
6	2	MODAL	LinModal	Mode	7	-5.08E-06	-0.00903	0	0	0	0.001463
6	2	MODAL	LinModal	Mode	8	0.000061	0.012209	0	0	0	-0.002702
6	2	MODAL	LinModal	Mode	9	0.002564	0.000052	0	0	0	-0.000022
6	2	MODAL	LinModal	Mode	10	0.002079	0.000744	0	0	0	-0.000204
6	2	elentro	NonModHist	Max		0.00004	0.015225	0	0	0	0.001704
6	2	elentro	NonModHist	Min		-0.000033	-0.015786	0	0	0	-0.001461
7	3	MODAL	LinModal	Mode	1	4.64E-07	-0.000288	0	0	0	-0.000103
7	3	MODAL	LinModal	Mode	2	-2.21E-06	0.00014	0	0	0	-0.000064
7	3	MODAL	LinModal	Mode	3	2.26E-06	0.000922	0	0	0	0.000385
7	3	MODAL	LinModal	Mode	4	-4.46E-06	-0.000583	0	0	0	0.000142
7	3	MODAL	LinModal	Mode	5	1.52E-06	-0.001504	0	0	0	-0.000943
7	3	MODAL	LinModal	Mode	6	2.35E-06	0.001572	0	0	0	0.001079

7	3	MODAL	LinModal	Mode	7	-0.000012	0.000138	0	0	0	-0.001385
7	3	MODAL	LinModal	Mode	8	-0.000014	-0.000572	0	0	0	0.001268
7	3	MODAL	LinModal	Mode	9	0.002566	-0.000011	0	0	0	-0.000013
7	3	MODAL	LinModal	Mode	10	-0.00208	-0.000605	0	0	0	0.000215
7	3	elentro	NonModHist	Max		0.000034	0.010654	0	0	0	0.003224
7	3	elentro	NonModHist	Min		-0.000036	-0.007898	0	0	0	-0.003262
8	4	MODAL	LinModal	Mode	1	0.000012	-0.000442	0	0	0	-0.000054
8	4	MODAL	LinModal	Mode	2	-0.000046	-0.000251	0	0	0	0.000056
8	4	MODAL	LinModal	Mode	3	0.000036	0.001922	0	0	0	0.000072
8	4	MODAL	LinModal	Mode	4	-0.000057	0.000392	0	0	0	-0.000158
8	4	MODAL	LinModal	Mode	5	6.08E-06	-0.005738	0	0	0	0.000366
8	4	MODAL	LinModal	Mode	6	0.000045	0.009074	0	0	0	-0.001231
8	4	MODAL	LinModal	Mode	7	-0.000147	-0.009573	0	0	0	0.001606
8	4	MODAL	LinModal	Mode	8	-0.000074	0.013521	0	0	0	-0.003062
8	4	MODAL	LinModal	Mode	9	0.000949	-0.000314	0	0	0	0.00008
8	4	MODAL	LinModal	Mode	10	-0.001686	0.001453	0	0	0	-0.000406
8	4	elentro	NonModHist	Max		0.00062	0.014726	0	0	0	0.001844
8	4	elentro	NonModHist	Min		-0.000766	-0.015497	0	0	0	-0.001581

max	0.002566	0.015225
min	-0.00208	-0.015786

